Ernst - Gunther Hansmann

WARTESCHLANGENPROBLEME BEI PERSONENAUFZUGSSYSTEMEN

Ein Simulationsvergleich zweier Gruppensammelsteuerungen

1973

1974

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547202_0029

WARTESCHLANGENPROBLEME BEI PERSONENAUFZUGSSYSTEMEN - EIN SIMULATIONSVERGLEICH ZWEIER GRUPPENSAMMELSTEUERUNGEN

Inaugural - Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Wirtschaftswissenschaft
durch den Fachbereich
Wirtschafts- und Sozialwissenschaften
der Westfälischen Wilhelms-Universität
zu Münster

vorgelegt von
Dipl.-Kfm. Ernst-Gunther Hansmann
aus Lage/Lippe
1973

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Erster Berichterstatter: Prof. Dr. Gülicher
Zweiter Berichterstatter: Prof. Dr. Bleymüller
Dekan: Prof. Tilly, Ph.D.
Tag der mündlichen Prüfung: 27. Juni 1973

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
VERZEICHNIS DER TABELLEN	V
VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN.....	X
1 PROBLEMSTELLUNG	1
2 BESCHREIBUNG DER AUFZUGSMODELLE	6
2.1 Grundannahmen für alle Modelle	6
2.2 Die einzelnen Modelle	9
3 DIE ANKUNFTS- UND ZIELVERTEILUNGEN DER EMPIRISCHEN MODELLE	10
3.1 Die Ankunftsverteilungen	10
3.1.1 Der Aufbau der Zählungen	10
3.1.2 Darstellung und Analyse	10
3.2 Die Zielverteilung	33
4 DER AUFBAU DER SIMULATIONSPROGRAMME	38
4.1 Die Simulation des Verkehrs	38
4.1.1 Die Simulation der Ankunftsverteilungen auf Grundlage der empirischen Erhebungen	38

Seite

4.1.2 Die Simulation der theoretischen Verteilungen 41
4.2 Die Simulation der Aufzugssteuerungen 43
4.2.1 Die Simulation der Zonensteuerung 43
4.2.2 Die Simulation der Normalsteuerung ... 51
4.3 Die Ergebniseinheit 52

5 DIE ERGEBNISSE DER SIMULATION UND IHRE ANALYSE . 58

5.1 Die Darstellung der Ergebnisse 58
5.2 Die Analyse der Ergebnisse 107
5.2.1 Modelle des Typs I 107
5.2.2 Modelle des Typs II 121
5.2.3 Modelle des Typs III 122
5.2.4 Modelle des Typs IV 124

6 SCHLUSSBETRACHTUNG 126

LITERATURVERZEICHNIS 127

VERZEICHNIS DER TABELLEN

		Seite
Tab. 2.1:	Einstiegszeiten als Funktion der Zahl der Einsteigenden	8
Tab. 3.1:	Ankünfte der Aufzugbenutzer während der Aufspitze	13
Tab. 3.2:	Mittelwerte und durchschnittliche Ankunftsintervalle der aggregierten Teilankunftsverteilungen	24
Tab. 3.3:	χ^2 - Test für die Approximation der beobachteten Ankunftsverteilung von $7^{\underline{20}}$ bis $7^{\underline{46}}$ durch eine Poissonverteilung mit $\mu = 2{,}3$	25
Tab. 3.4:	χ^2 - Test für die Approximation der beobachteten Ankunftsverteilung von $7^{\underline{20}}$ bis $7^{\underline{26}}$ durch eine Poissonverteilung mit $\mu = 1{,}7$, $\mu = 1{,}8$ und $\mu = 1{,}9$	26
Tab. 3.5:	χ^2 - Test für die Approximation der beobachteten Ankunftsverteilung von $7^{\underline{26}}$ bis $7^{\underline{32}}$ durch eine Poissonverteilung mit $\mu = 2{,}8$, $\mu = 2{,}9$ und $\mu = 3{,}0$	27
Tab. 3.6:	χ^2 - Test für die Approximation der beobachteten Ankunftsverteilung von $7^{\underline{32}}$ bis $7^{\underline{38}}$ durch eine Poissonverteilung mit $\mu = 2{,}4$, $\mu = 2{,}5$, $\mu = 2{,}6$ und $\mu = 2{,}7$	28

		Seite
Tab. 3.7:	χ^2 - Test für die Approximation der beobachteten Ankunftsverteilung von $7^{\underline{38}}$ bis $7^{\underline{46}}$ durch eine Poissonverteilung mit $\mu = 2$, $\mu = 2{,}1$, $\mu = 2{,}10938$ und $\mu = 2{,}2$	29
Tab. 3.8:	Die Aufteilung der Belegschaft auf die Stockwerke	33
Tab. 3.9:	Prozentanteile der Aussteiger bis Stockwerk 5	34
Tab. 3.10:	Die empirische Zielverteilung	36
Tab. 4.1:	Verteilungsfunktionen der Ankunftsverteilungen der Modelle der Gruppe I	39
Tab. 4.2:	Organisationstypen für die Zonensteuerung bei 10 Zieletagen und 5 Aufzügen	44
Tab. 4.3:	Zahl der Möglichkeiten für die Organisationstypen der Zonensteuerung	45
Tab. 4.4:	Zuordnung der Zonen an die Aufzüge bei empirischer Zielverteilung	46
Tab. 4.5:	Zuordnung der Zonen an die Aufzüge bei einer gleichverteilten Zielverteilung	46
Tab. 4.6:	Blockoutput bei Zonensteuerung mit 5 Fahrstühlen für Modell 3 , Typ I	53
Tab. 4.7:	Vortest auf Autokorrelation von 20 Blockmittelwerten bei einer Blocklänge von 400	56
Tab. 5.1:	Wartezeitverteilung bei Normalsteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung I, in sec	60

Seite

Tab. 5.2: Wartezeitverteilung bei Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung I, in sec 60

Tab. 5.3: Reisezeitverteilung bei Normalsteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung I, in sec 61

Tab. 5.4: Reisezeitverteilung bei Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung I, in sec 61

Tab. 5.5: Verweilzeitverteilung bei Normalsteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung I, in sec 62

Tab. 5.6: Verweilzeitverteilung bei Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung I, in sec 62

Tab. 5.7: Wartezeitverteilung bei Normalsteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung II, in sec 63

Tab. 5.8: Wartezeitverteilung bei Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung II, in sec 63

Tab. 5.9: Reisezeitverteilung bei Normalsteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung II, in sec 64

Tab. 5.10: Reisezeitverteilung bei Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung II, in sec 64

Tab. 5.11: Verweilzeitverteilung bei Normalsteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung II, in sec 65

Tab. 5.12: Verweilzeitverteilung bei Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung II, in sec 65

Tab. 5.13: Wartezeitverteilung bei Normalsteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung III, in sec 66

Tab. 5.14: Wartezeitverteilung bei Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung III, in sec 66

Seite

Tab. 5.15: Reisezeitverteilung bei Normalsteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung III, in sec 67

Tab. 5.16: Reisezeitverteilung bei Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung III, in sec 67

Tab. 5.17: Verweilzeitverteilung bei Normalsteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung III, in sec 68

Tab. 5.18: Verweilzeitverteilung bei Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung III, in sec 69

Tab. 5.19: Wartezeitverteilung bei Normalsteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung IV, in sec 69

Tab. 5.20: Wartezeitverteilung bei Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung IV, in sec 69

Tab. 5.21: Reisezeitverteilung bei Normalsteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung IV, in sec 70

Tab. 5.22: Reisezeitverteilung bei Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung IV, in sec 70

Tab. 5.23: Verweilzeitverteilung bei Normalsteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung IV, in sec 71

Tab. 5.24: Verweilzeitverteilung bei Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung IV, in sec 71

Tab. 5.25: Warte-, Reise- und Verweilzeiten bei Normalsteuerung, Typ II, poissonverteilte Ankünfte mit μ = 2,8583, 3 Aufzüge 72

Tab. 5.26: Warte-, Reise- und Verweilzeiten bei Zonensteuerung, Typ II, poissonverteilte Ankünfte mit μ = 2,8583, 3 Aufzüge 72

Seite

Tab. 5.27: Parameter der Wartezeitverteilungen bei empirischer Zielverteilung und poissonverteilten Ankünften, Typ III, in sec 73

Tab. 5.28: Parameter der Reisezeitverteilungen bei empirischer Zielverteilung und poissonverteilten Ankünften, Typ III, in sec 74

Tab. 5.29: Parameter der Verweilzeitverteilungen bei empirischer Zielverteilung und poissonverteilten Ankünften, Typ III, in sec 75

Tab. 5.30: Parameter der Wartezeitverteilungen bei einer Gleichverteilung der Ziele und poissonverteilten Ankünften, Typ IV, in sec 76

Tab. 5.31: Parameter der Reisezeitverteilungen bei einer Gleichverteilung der Ziele und poissonverteilten Ankünften, Typ IV, in sec 77

Tab. 5.32: Parameter der Verweilzeitverteilungen bei einer Gleichverteilung der Ziele und poissonverteilten Ankünften, Typ IV, in sec 78

Tab. 5.33: Anzahl Zwischenstops in Abhängigkeit von der Zieletage bei empirischer Zielverteilung 116

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

		Seite
Abb. 3.1:	Beispiel einer Zählunterlage für die Erfassung der Ankunftsverteilung	11
Abb. 3.2:	Anordnung der Aufzüge im Erdgeschoß	12
Abb. 3.3:	Ankunftsverteilung der Aufzugsbenutzer am 14.4.1972 von $7^{\underline{16}}$ - $7^{\underline{54}}$ im Erdgeschoß	14
Abb. 3.4:	Ankunftsverteilung der Aufzugsbenutzer am 17.4.1972 von $7^{\underline{16}}$ - $7^{\underline{54}}$ im Erdgeschoß	15
Abb. 3.5:	Ankunftsverteilung der Aufzugsbenutzer am 18.4.1972 von $7^{\underline{16}}$ - $7^{\underline{54}}$ im Erdgeschoß	16
Abb. 3.6:	Ankunftsverteilung der Aufzugsbenutzer am 19.4.1972 von $7^{\underline{16}}$ - $7^{\underline{54}}$ im Erdgeschoß	17
Abb. 3.7:	Ankunftsverteilung der Aufzugsbenutzer am 20.4.1972 von $7^{\underline{16}}$ - $7^{\underline{54}}$ im Erdgeschoß	18
Abb. 3.8:	Ankunftsverteilung der Aufzugsbenutzer am 24.4.1972 von $7^{\underline{16}}$ - $7^{\underline{54}}$ im Erdgeschoß	19
Abb. 3.9:	Ankunftsverteilung der Aufzugsbenutzer am 25.4.1972 von $7^{\underline{16}}$ - $7^{\underline{54}}$ im Erdgeschoß	20
Abb. 3.10:	Ankunftsverteilung der Aufzugsbenutzer am 26.4.1972 von $7^{\underline{16}}$ - $7^{\underline{54}}$ im Erdgeschoß	21
Abb. 3.11:	Ankunftsverteilung der Aufzugsbenutzer am 27.4.1972 von $7^{\underline{16}}$ - $7^{\underline{54}}$ im Erdgeschoß	22

		Seite
Abb. 3.12:	Ankunftsverteilung der Aufzugsbenutzer am 28.4.1972 von $7^{\underline{16}}$ - $7^{\underline{54}}$ im Erdgeschoß	23
Abb. 5.1:	Wartezeitverteilung bei Normalsteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung I, n Aufzüge	79
Abb. 5.2:	Wartezeitverteilung bei Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung I, n Aufzüge	80
Abb. 5.3:	Reisezeitverteilung bei Normalsteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung I, n Aufzüge	81
Abb. 5.4:	Reisezeitverteilung bei Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung I, n Aufzüge	82
Abb. 5.5:	Verweilzeitverteilung bei Normalsteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung I, n Aufzüge	83
Abb. 5.6:	Verweilzeitverteilung bei Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung I, n Aufzüge	84
Abb. 5.7:	Totale durchschnittliche Warte-,Reise- und Verweilzeiten bei Normalsteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung I, n Aufzüge	85
Abb. 5.8:	Totale durchschnittliche Warte-, Reise- und Verweilzeiten bei Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung I, n Aufzüge	86
Abb. 5.9:	Totale durchschnittliche Wartezeiten bei Normal- und Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung I, n Aufzüge	87
Abb. 5.10:	Totale durchschnittliche Reisezeiten bei Normal- und Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung I, n Aufzüge	88
Abb. 5.11:	Totale durchschnittliche Verweilzeiten bei Normal- und Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung I, n Aufzüge	89

Seite

Abb. 5.12: Wartezeitverteilung bei Normalsteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung II, n Aufzüge 90

Abb. 5.13: Wartezeitverteilung bei Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung II, n Aufzüge 91

Abb. 5.14: Reisezeitverteilung bei Normalsteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung II, n Aufzüge 92

Abb. 5.15: Reisezeitverteilung bei Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung II, n Aufzüge 93

Abb. 5.16: Verweilzeitverteilung bei Normalsteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung II, n Aufzüge 94

Abb. 5.17: Verweilzeitverteilung bei Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung II, n Aufzüge 95

Abb. 5.18: Totale durchschnittliche Warte-, Reise- und Verweilzeiten bei Normalsteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung II, n Aufzüge 96

Abb. 5.19: Totale durchschnittliche Warte-, Reise- und Verweilzeiten bei Zonensteuerung, Typ I , Ankunftsverteilung II, n Aufzüge 97

Abb. 5.20: Totale durchschnittliche Wartezeiten bei Normal- und Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung II, n Aufzüge 98

Abb. 5.21: Totale durchschnittliche Reisezeiten bei Normal- und Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung II, n Aufzüge 99

Abb. 5.22: Totale durchschnittliche Verweilzeiten bei Normal- und Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung II, n Aufzüge 100

Seite

Abb. 5.23: Totale durchschnittliche Wartezeiten bei Normal- und Zonensteuerung als Funktion von $\mu_{poisson}$ der Ankunftsverteilung - bei empirischer Zielverteilung und n = 6 Aufzügen 101

Abb. 5.24: Totale durchschnittliche Reisezeiten bei Normal- und Zonensteuerung als Funktion von $\mu_{poisson}$ der Ankunftsverteilung - bei empirischer Zielverteilung und n = 6 Aufzügen 102

Abb. 5.25: Totale durchschnittliche Verweilzeiten bei Normal- und Zonensteuerung als Funktion von $\mu_{poisson}$ der Ankunftsverteilung - bei empirischer Zielverteilung und n = 6 Aufzügen 103

Abb. 5.26: Totale durchschnittliche Wartezeiten bei Normal- und Zonensteuerung als Funktion von $\mu_{poisson}$ der Ankunftsverteilung - bei gleichverteilten Zielen und n = 6 Aufzügen 104

Abb. 5.27: Totale durchschnittliche Reisezeiten bei Normal- und Zonensteuerung als Funktion von $\mu_{poisson}$ der Ankunftsverteilung - bei gleichverteilten Zielen und n = 6 Aufzügen 105

Abb. 5.28: Totale durchschnittliche Verweilzeiten bei Normal- und Zonensteuerung als Funktion von $\mu_{poisson}$ der Ankunftsverteilung- bei gleichverteilten Zielen und n = 6 Aufzügen 106

1 Problemstellung

In dieser Arbeit sollen Steuerungsarten für Personenaufzüge in Bezug auf ihre Effizienz verglichen werden. Es sollen zwei G r u p p e n s a m m e l s t e u e r u n g e n mit Tendenzschaltungen unter unterschiedlichen Verkehrsbedingungen untersucht werden.

Bei einer G r u p p e n s a m m e l s t e u e r u n g [1] besteht die Aufzugsanlage aus mehreren - mindestens zwei - Aufzügen. Rufe, die von außerhalb der Kabinen, also von den Etagen, kommen, werden alle auf eine gemeinsame Rufverteilungsanlage geleitet. Diese A u ß e n r u f e werden sodann in einer zweckmäßigen Reihenfolge von den einzelnen Aufzügen des Systems abgearbeitet. Abgesehen von der untersten und der obersten Etage, bei denen sich jeweils nur ein Richtungsknopf - für die Auf- bzw. Abwärtsrichtung - befindet, gibt es in jeder Etage zwei Richtungsknöpfe für das gesamte Aufzugssystem.

Unter einer Tendenzschaltung versteht man eine Zusatzsteuerung, die zu Spitzenzeiten manuell oder automatisch - durch ein Programm - eingeschaltet wird. In diesem Fall spricht man auch von programmierter Gruppensammelsteuerung.

Im folgenden sollen eine Z o n e n s t e u e r u n g und eine normale Gruppensammelsteuerung während der Aufspitze untersucht werden.

---

1 Vgl. Carl Ritter, Grundzüge neuer Steuerungsarten bei Aufzügen. In: Fördern und Heben, 3. Jg. 1953, S. 125-126. Ernst-Otto Scheuermann: Die Planung und Bemessung von Aufzügen. In: Deutsche Hebe- und Fördertechnik, 9. Jg. 1963, S. 404 - 408

Unter einer Z o n e n s t e u e r u n g versteht man eine Steuerungsart, bei der einzelnen Aufzügen verschiedene Zonen des Gebäudes zugeteilt werden. Beispielsweise könnte in einem zehnstöckigen Haus mit zwei Aufzügen A und B der Aufzug A die unteren fünf und der Aufzug B die oberen fünf Etagen bedienen, oder etwa A bedient die Stockwerke 1,3,5, 7 und 9 und B die restlichen.
Diese Organisation entspricht also einem Schaltermodell, bei dem jeder Schalter für bestimmte Geschäfte spezialisiert ist. Die Bandbreite der Geschäfte kann dabei so beschaffen sein, daß sich die Schaltergeschäfte verschiedener Schalter überlappen oder daß sie disjunkt sind. Auf die Zonensteuerung übertragen bedeutet das, daß einige Stockwerke von mehreren Aufzügen bedient werden bzw. daß jedem Stockwerk nur jeweils ein Aufzug zugeordnet ist.

Die normale Gruppensammelsteuerung - im folgenden N o r m a l s t e u e r u n g genannt - entspricht einer Schalterorganisation, bei der jeder Schalter alle Schaltergeschäfte bearbeiten kann - parallele identische Schalter. Der Benutzer kann mit jedem Aufzug in jedes beliebige Stockwerk fahren.

Die oben genannten Aufzugssteuerungen sollen während der morgendlichen Aufspitze - Spitzenverkehr in Aufwärtsrichtung - untersucht werden. Durch die T e n d e n z s c h a l t u n g werden die Aufzüge so gesteuert, daß sie auf Außenrufe aus dem Gebäude nicht reagieren. Einzige Einstiegsmöglichkeit ist an der Haupthaltestelle - zumeist im Erdgeschoß, von dort gelangen die Benutzer zu ihren Zielen. Ist der letzte Benutzer ausgestiegen, fährt der Aufzug ohne Halt sofort zur Haupthaltestelle zurück - automatischer Rücklauf.

Nach allgemeiner Auffassung in der Literatur ist die morgendliche Aufspitze die entscheidende Komponente in Bezug auf den Verkehrsandrang, wenn man die notwendige Kapazität und Förderleistung einer Aufzugsanlage berechnen will. Die Aufzugsanlagen werden in der Praxis so ausgelegt, daß sie den morgendlichen Spitzenverkehr mit vertretbaren durchschnittlichen Verweilzeiten bewältigen können, da dieser Verkehr die größten Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Anlage stellt[1]. Ohne vorgegebene Steuerungsart läßt sich jedoch keine Berechnung der Leistungsfähigkeit vornehmen. Es soll in dieser Arbeit gezeigt werden, unter welchen Bedingungen die eine oder die andere Gruppensammelsteuerung überlegen ist. Eine neu zu planende Aufzugsanlage mit der angemessenen Steuerungsart wird in der Regel kleiner ausfallen als eine mit einer anderen Programmsteuerung, eine bestehende Anlage könnte mit einer entsprechenden Steuerung den maximalen Verkehrsandrang vielleicht besser bewältigen.

---

[1] Vgl. hierzu :
F.A.Annett, Electric elevators, 2. ed., New York 1935, S.466.
Howard B.Cook, Selecting elevators for an office building. In: Power, New York 1932, S. 404: The morning traffic peak is used as the basis for calculating elevator requirements even though the evening peak is higher, because passengers congregating in the evening on the upper floors is not so objectionable as crowding at the first floor.
Werner Müller, Die Ermittlung der erforderlichen Anzahl und Größe von Aufzügen. In: Deutsche Architektur, 7. Jg. Berlin 1966, S. 442: Ist die Aufzugsanlage für das Füllen eines Gebäudes bemessen, genügt sie demnach auch für das normale Entleeren desselben und darüber hinaus im allgemeinen auch für den internen Verkehr.
Joris Schröder, Personenaufzüge - Planung und Bemessung. In: VDI-Zeitschrift, Berlin 1957, S.805: Die Erfahrung hat gezeigt, daß das Füllen im allgemeinen die schwierigste Aufgabe für den Aufzug darstellt. Ist er so bemessen, daß er sie meistert, so reicht seine Leistung auch für die übrigen Verkehrsarten aus.
Ders., Personenaufzüge - Berechnung ihrer Förderleistung als Planungsgrundlage. In: Fördern und Heben, 5.Jg.Wiesbaden 1955, S.44.

Interessant ist die Fragestellung, wie empfindlich die Gruppensammelsteuerungen auf Änderungen der Verkehrsintensität, der Zahl der eingesetzten Aufzüge und anderer Parameter des Systems reagieren.

Effizienzkriterium für die Güte der Organisation einer Aufzugsanlage soll bei gegebener Anzahl von Aufzügen die durchschnittliche Verweilzeit eines Benutzers im System sein. Die Verweilzeit setzt sich dabei aus Warte- und Reisezeit zusammen. Allgemein wird bei Warteschlangenuntersuchungen, besonders bei der Suche nach einer optimalen Schalterorganisation, versucht, in das Effizienzkriterium sowohl Wartezeiten der Benutzer als auch Leerzeiten der Schalter einzubeziehen. Beides läßt sich als Kosten interpretieren, die durch Zeiteinheiten gemessen werden.

Bei den im folgenden untersuchten Modellen wird jeweils von einer bestehenden fest vorgegebenen Aufzugsanlage ausgegangen und nur die Steuerungsart in Bezug auf die Verweilzeit der Benutzer verglichen. Da hierbei wohl unterstellt werden kann, daß sich die Unterhaltungskosten derselben Aufzugsanlage bei unterschiedlicher Steuerung nicht relevant ändern, kann beim Effizienzkriterium auf diese Seite verzichtet werden.

In der Aufzugsliteratur wird die Güte einer Aufzugsanlage im allgemeinen nur anhand der mittleren Wartezeit eines Benutzers gemessen,[1] die Reisezeit - also die Bedienungszeit- wird vernachlässigt. Diese Vernachlässigung der Bedienungszeiten ist sicher bei sehr vielen Warteschlangenproblemen sinnvoll, nämlich dann, wenn die Bedienungszeiten unabhängig von der Länge der Warteschlange sind. So wird sich eine Ver-

---

1 Vgl. hierzu:
Werner Müller, Die Ableitung von Grenzwerten für die Wahl des Fassungsvermögens und der Geschwindigkeit von Personenaufzügen. In: Deutsche Hebe- und Fördertechnik, 14. Jg. 1968, S. 407 - 409
G.Hahn, Berechnung der Förderleistung von Personenaufzügen, In: Fördern und Heben, 4. Jg. 1954, S. 16 - 18
Peter Gräbner, Zur Ermittlung der Förderleistung bei Personenaufzügen. In: Hebezeuge und Fördermittel, 1. Jg. 1961, S. 167 - 172

ringerung der Zahl der Schalter in einer Bank ceteris paribus wohl in einer Zunahme der Wartezeiten der Kunden bemerkbar machen, die Länge der Bedienungszeiten bleibt jedoch hiervon unberührt.
Bei einer Aufzugsanlage würde eine Verringerung der Zahl der Aufzüge jedoch Warte- und Reisezeiten tendenziell verlängern. Durch die Verminderung der Anzahl der Aufzüge wird die Kapazitätsauslastung pro Fahrstuhl höher, es fahren also pro Fahrt mehr Personen mit. Durch die dadurch häufiger notwendigen Zwischenstops verlängert sich die durchschnittliche Reisezeit in ein oberes Stockwerk. Auch bei dem Vergleich von Gruppensammelsteuerungen müssen sowohl Warte- als auch Reisezeiten berücksichtigt werden, da beide durch die Wahl der Steuerung beeinflußt werden.

Eine analytische Berechnung der Warte- und Reisezeiten für die zu untersuchenden Aufzugsmodelle ist wegen der Komplexität der Systeme nicht möglich.
Zur Lösung der Probleme wird die Simulationsmethode herangezogen. Die Verwendung einer Simulationssprache erschien nicht sinnvoll. Die Simulationsprogramme, die in Fortran geschrieben wurden, liefen auf der IBM 360/50 im Rechenzentrum der Universität Münster.

2 Beschreibung der Aufzugsmodelle

2.1 Grundannahmen für alle Modelle

Grundlage der Simulationsmodelle ist eine Aufzugsanlage in einem elfstöckigen Behördengebäude in Münster mit sechs Aufzügen. In den Modellen wird die Zahl der Aufzüge von 1 bis 6 variiert. Die maximale Geschwindigkeit, die Beschleunigungs- und Verzögerungszeiten, die Zeiten, die für das Öffnen und Schließen der Fahrstuhltüren benötigt werden, sowie die Zeit des Offenstehens einer Tür, nachdem der letzte Benutzer eingestiegen ist; diese empirisch bestimmten Daten der oben genannten Anlage wurden der Simulation zugrundegelegt. Weiter wurden in diesem Gebäude die Zeiten gemessen, die die Benutzer zum Einsteigen und zum Verlassen der Kabinen benötigen.
Als Daten ergeben sich im einzelnen:

Geschoßzahl: Kellergeschoß, Untergeschoß, Erdgeschoß, 10 Obergeschosse

Kapazität eines Aufzuges: 16 Personen

Türschließzeit: 2 sec

Türöffnungszeit: 2 sec

Offenhalten einer Tür: 2 sec - Nach Durchschreiten der Lichtschranke an der Kabinentür vergehen 2 sec , bis die Tür mit dem Schließen beginnt.

Aus der maximalen Geschwindigkeit - 1,8 m/sec , den Beschleunigungs- und Verzögerungswerten der Aufzüge läßt sich leicht die Zeit errechnen, die ein Aufzug für eine non-stop-

Fahrt für n Etagen benötigt. Diese Zeiten wurden in 104 Messungen empirisch überprüft. Es ergab sich als Ergebnis einer Regressionsanalyse:

$t_n = 8{,}062 + 1{,}8\ n$ Zeitdauer für n-Etagen-Fahrt in Sekunden - 2.1 -

$r = 0{,}991$ Produkt-Moment-Korrelationskoeffizient

- 2.1 - wurde in die Simulationsprogramme als Fahrzeitformel eingebaut.

Mit einer Faustregel für die Zeiten, die die Benutzer zum Ein- und Aussteigen der Kabinen brauchen, wollte der Verfasser sich nicht zufrieden geben.Deshalb wurden für unterschiedliche Zahl von Ein- und Aussteigern die Ein- und Ausstiegszeiten gemessen. Die Messungen der Einstiegszeiten wurden morgens , die der Ausstiegszeiten morgens und abends vorgenommen. Die Resultate der Messungen für die Einstiegszeiten, sowie die Ergebnisse einer Regressionsanalyse werden in Tabelle - 2.1 - dargestellt.
Die Betrachtung der Differenzen $(t_i - t_{i-1})$ sowie der hohe Korrelationskoeffizient zeigen, daß mithilfe von - 2.2 - eine gute Approximation der Einstiegszeiten erreicht ist. Diese Formel wird dem Simulationsprogramm zugrundegelegt.

Für die Ausstiegszeiten $t_{aus}(i)$ ergaben sich morgens und abends Unterschiede:

morgens:

$t_{aus}(i) = -\ 0{,}0708 + 1{,}7337\ i$ - 2.3 -

$r = o{,}735$ 120 Messungen

abends:

$t_{aus}(i) = o{,}24159 + 0{,}99658\ i$ - 2.4 -

$r = 0.972$ 120 Messungen .

Tab. 2.1: Einstiegszeiten als Funktion der Zahl der Einsteigenden

Zahl der Einsteigenden	Durchschnittl. Einstiegszeit	$t_{ein}(i) - t_{ein}(i-1)$
i	$t_{ein}(i)$[sec]	
1	1,114	1,114
2	2,604	1,490
3	4,508	1,904
4	5,878	1,370
5	7,246	1,368
6	9,025	1,779
7	10,567	1,542
8	12,001	1,434
9	14,533	2,532
10	14,151	-0,382
11	15,302	1,151

$t_{ein}(i) = -0,5357 + 1,5964\ i$ - 2.2 -

r = 0,9565 120 Messungen

Die Grenzausstiegszeit in -2.4- ist viel geringer als in - 2.3 - , während sich die Ein- und Ausstiegszeiten morgens kaum unterscheiden. Hieraus könnte geschlossen werden, daß die Benutzer zum Feierabend schneller die Aufzüge verlassen als morgens, wenn sie zur Arbeit kommen, während im Ein- und Ausstiegsverhalten morgens kaum ein Unterschied besteht. Auf einen Signifikanztest wurde jedoch verzichtet, der Simulation wurde das Ausstiegsverhalten in der Morgenspitze zugrunde gelegt.

2.2 Die einzelnen Modelle

Zunächst werden Simulationsmodelle durchgespielt, denen Kundenankunftsverteilungen zugrundeliegen, die auf empirischen Messungen beruhen. Die Verteilung der Ziele der Aufzugsbenutzer ist ebenfalls empirischer Art. Die Zahl der Aufzüge wird von 1 bis 6 variiert, es entstehen insgesamt 24 Modelle vom Typ I .

Hiernach wird ein System simuliert, in dem die Kundenankünfte poissonverteilt sind. Der Mittelwert dieser Poissonverteilung entspricht dem einer obigen empirischen Ankunftsverteilung. Die Zahl der Aufzüge beträgt drei (Typ II).

In den Modellen des Typs III werden poissonverteilte Ankünfte unterstellt, die Mittelwerte der Poissonverteilungen werden variiert. Die Zielverteilung ist dieselbe empirische Verteilung, die auch bei Typ I und II verwendet wird. Die Zahl der Aufzüge ist konstant sechs.

Die Modelle des Typs IV unterscheiden sich von denen des Typs III dadurch, daß auch die Zielverteilung nicht mehr empirischer Art ist. Für die Verteilung der Zielstockwerke wird eine Gleichverteilung unterstellt. Das impliziert, daß keine Treppenbenutzung zugelassen ist sowie daß auf jeder Etage gleich viele Menschen arbeiten.
Variiert wird auch hier die Ankunftsintensität, die Zahl der Aufzüge des Systems beträgt wiederum sechs.

3 Die Ankunfts- und Zielverteilungen der empirischen Modelle

3.1 Die Ankunftsverteilungen

3.1.1 Der Aufbau der Zählungen

Die Zählungen wurden vom 14.4. - 28.4.1972 an insgesamt 10 Tagen in der Zeit von $7^{\underline{16}}$ bis $7^{\underline{54}}$ Uhr vorgenommen. Zählort war die Eingangshalle eines Behördengebäudes in Münster mit 859 Beschäftigten[1]. Der Arbeitsbeginn war $7^{\underline{30}}$ Uhr. Da keine gleitende Arbeitszeit eingeführt war, eignete sich dieses Gebäude sehr für die empirischen Erhebungen. Die Aufzüge in diesem Gebäude sind in zwei gegenüberliegenden Dreiergruppen angeordnet - vgl.Abb. 3.2 . Der Zugang zu den Aufzügen erfolgt morgens nur im Erdgeschoß, wenn auch im Keller eine Einsteigemöglichkeit für Schwerbeschädigte besteht. Da an zwei Zähltagen jedoch diese Möglichkeit insgesamt nur einmal benutzt wurde, wurde in den Simulationsprogrammen nur von einer Einsteigemöglichkeit, nämlich im Erdgeschoß, ausgegangen. Im Erdgeschoß konnten von den Zählern beide Zugangsmöglichkeiten zu dem Warteraum zwischen den Aufzügen gut beobachtet werden. In eine Zählunterlage - vgl. Abb. 3.1 - wurde die Zahl der eintreffenden Aufzugbenutzer pro Zeitintervall von 15 Sekunden eingetragen.

---

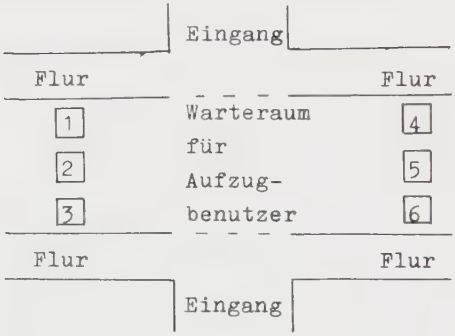
[1] Die Messungen führte der Verfasser mit einigen Einsatzstudenten des Institutes für Ökonometrie und Wirtschaftsstatistik der Universität Münster durch.

Abb. 3.1: Beispiel einer ausgefüllten Zählunterlage für die Erfassung der Ankunftsverteilung

Ankunftsverteilung im Erdgeschoss Tag: 7.5. Zähler: Ha

1	3	0	1	17	0	0	3	18	0	0	3	19	0	1	2
20	4	0	0	21	1	2	3	22	4	3	4	23	5	2	3
24	1	4	0	25	6	1	1	26	7	4	3	27	3	0	2
28	2	0	1	29	2	6	7	30	3	1	2	31	0	5	1
32	1	1	1	33	3	2	1	34	1	3	3	35	5	3	2
36	0	3	4	37	2	3	5	38	2	2	3	39	1	3	3
40	2	2	1	41	1	4	5	42	5	0	3	43	1	0	2
44	0	0	1	45	3	1	2	46	0	1	1	47	0	2	2
48	0	1	0	49	3	1	2	50	5	1	2	51	0	0	2
52	1	0	1	53	2	0	2	54	1	1	4	55	1	0	0

Abb. 3.2 : Anordnung der Aufzüge [1] bis [6] im Erdgeschoß



3.1.2 Darstellung und Analyse

In den folgenden Abbildungen - 3.3 bis 3.12 - sind die Ankunftsverteilungen für die einzelnen Beobachtungstage dargestellt[1]. Die 15-Sekunden-Intervalle sind zu einminütigen und zu zweiminütigen Intervallen zusammengefasst. Die grafischen Darstellungen zeigen, daß sich keine einheitliche - z.B. um $7^{\underline{30}}$ symmetrische - Verteilung konstruieren läßt, die die Ankünfte an einem Tag beschreibt. Deshalb wird eine Aggregation über die Beobachtungstage vorgenommen - vgl. Tab. 3.1. Es schälen sich etwa sechs unterschiedliche Ankunftsverteilungen heraus.

Bis $7^{\underline{20}}$ Uhr ist die durchschnittliche Verkehrsintensität sehr gering; in der gesamten Beobachtungszeit kommen insgesamt nur 143 Personen in dem Warteraum an, also pro Tag pro Minute 3,507 Personen. Von $7^{\underline{20}}$ Uhr bis $7^{\underline{26}}$ treffen pro Minute 7,35 Personen ein, von $7^{\underline{26}}$ Uhr bis $7^{\underline{32}}$ 11,43, von $7^{\underline{32}}$ bis $7^{\underline{38}}$ 9,9, von $7^{\underline{38}}$ bis $7^{\underline{46}}$ 8,55, und von $7^{\underline{46}}$ bis $7^{\underline{54}}$ kommen pro

---

[1] Unter Ankunftsverteilung wird hier die Verteilung der Ankünfte im zeitlichen Ablauf verstanden. Dieser Begriff wird auch zur Beschreibung der Wahrscheinlichkeitsfunktion der Zufallsvariablen Zahl der Ankünfte in gegebenem Zeitintervall verwendet.

Tab. 3.1 : Ankünfte der Aufzugbenutzer während der Aufspitze

Beob. Intervall	Beobachtungtag im April 1972 14.	17.	18.	19.	20.	24.	25.	26.	27.	28.	Kumul. Ank.	
7^{16} - 7^{18}	6	4	5	6	6	7	9	5	4	8	60	
- 7^{20}	6	9	2	5	8	10	9	10	18	6	83	
- 7^{22}	16	16	23	14	16	15	13	16	13	5	147	
- 7^{24}	8	11	11	12	13	16	24	7	17	13	132	I
- 7^{26}	16	15	12	16	16	14	15	17	14	15	150	
- 7^{28}	27	20	25	11	21	21	24	25	18	39	231	
- 7^{30}	29	25	24	19	27	19	23	26	21	29	242	II
- 7^{32}	20	14	14	28	26	24	19	28	17	23	213	
- 7^{34}	22	26	18	18	18	15	15	20	21	23	196	
- 7^{36}	22	16	20	19	18	23	19	25	19	25	206	III
- 7^{38}	25	27	28	16	16	22	26	15	19	16	210	
- 7^{40}	22	14	17	18	17	22	16	12	19	9	166	
- 7^{42}	28	13	14	9	19	16	24	27	12	20	182	
- 7^{44}	11	21	29	22	28	17	12	14	15	9	178	IV
- 7^{46}	16	13	11	27	14	14	12	11	22	18	158	
- 7^{48}	13	15	11	11	8	13	6	15	12	15	119	
- 7^{50}	9	11	15	8	17	19	11	14	12	16	132	
- 7^{52}	9	9	1	12	8	15	11	7	13	7	92	
- 7^{54}	17	8	2	9	11	17	8	10	17	10	109	
Summe	322	287	282	280	297	319	296	304	303	306	3006	

Abb. 3.3: Ankunftsverteilung der Aufzugsbenutzer am 14.4.1972 von $7^{\underline{16}}$ - $7^{\underline{54}}$ im Erdgeschoß

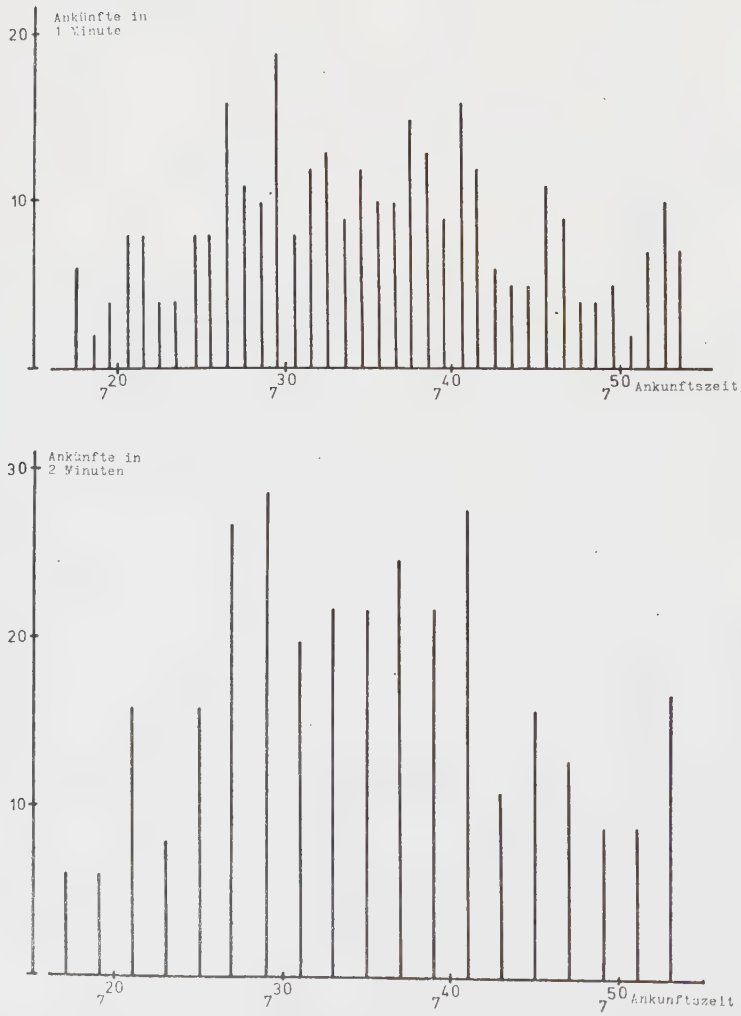


Abb. 3.4: Ankunftsverteilung der Aufzugsbenutzer am 17.4.1972 von $7^{\underline{16}}$ - $7^{\underline{54}}$ im Erdgeschoß

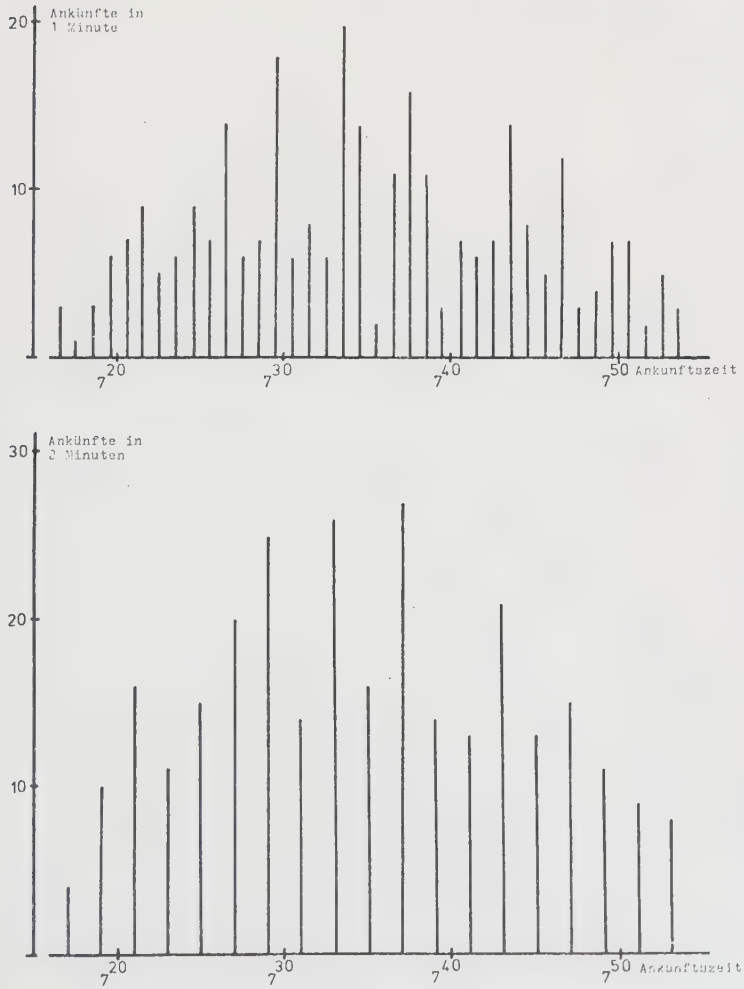


Abb. 3.5: Ankunftsverteilung der Aufzugsbenutzer am 18.4.1972 von $7^{\underline{16}}$ - $7^{\underline{54}}$ im Erdgeschoß

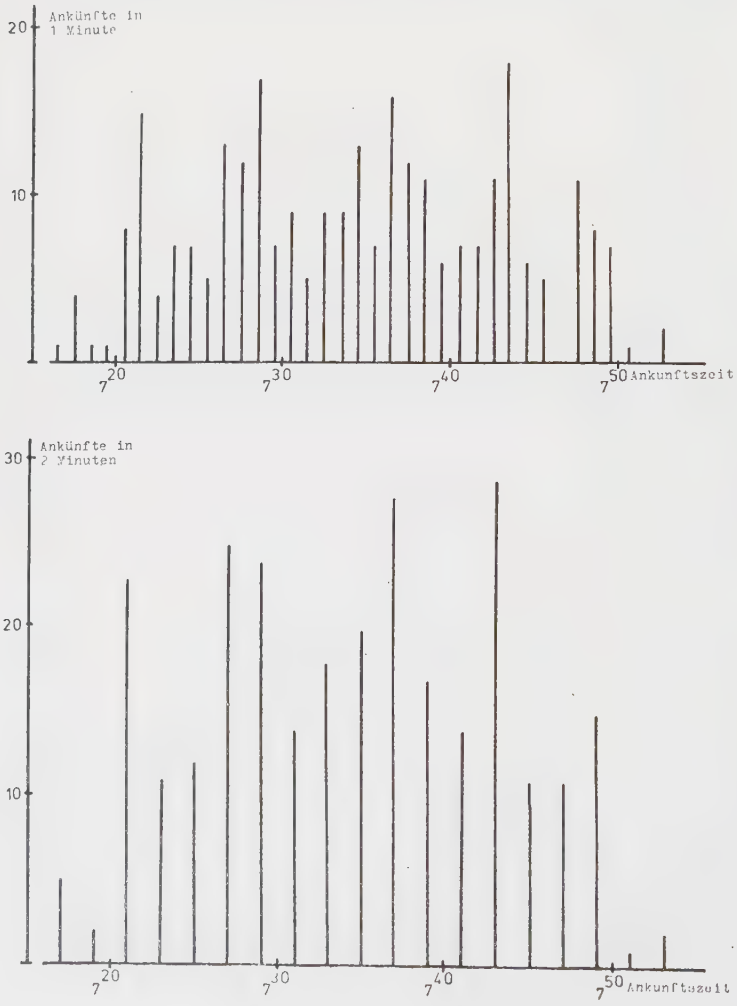


Abb. 3.6: Ankunftsverteilung der Aufzugsbenutzer am 19.4.1972 von 7^{16} - 7^{54} im Erdgeschoß

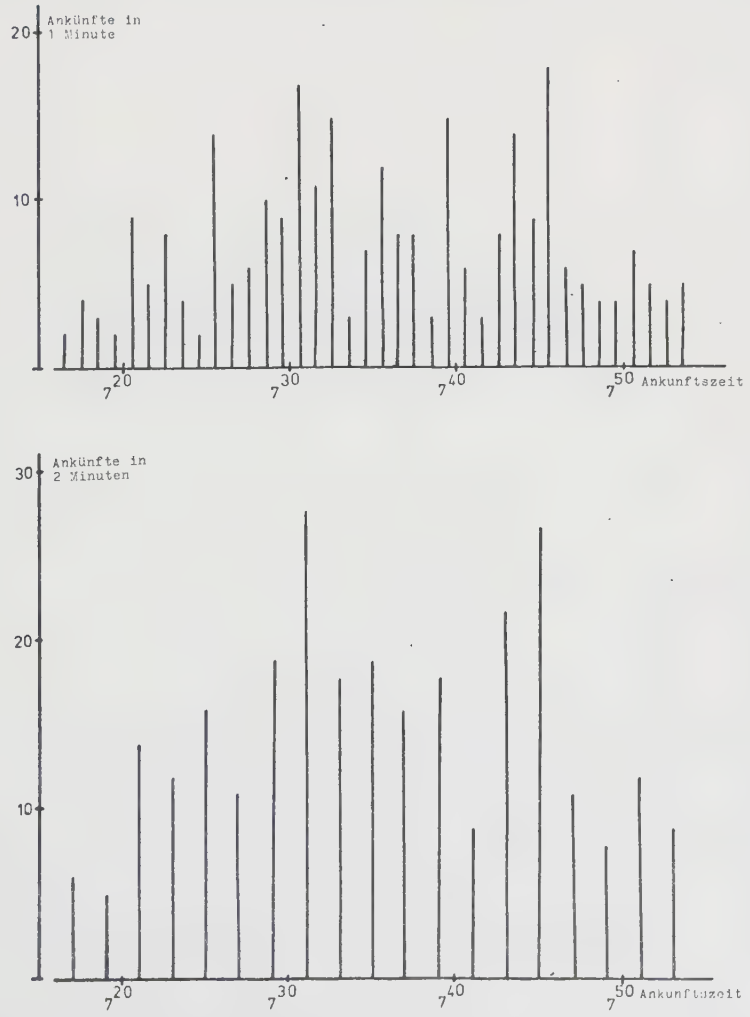


Abb. 3.7: Ankunftsverteilung der Aufzugsbenutzer am 20.4.1972 von $7^{\underline{16}}$ - $7^{\underline{54}}$ im Erdgeschoß

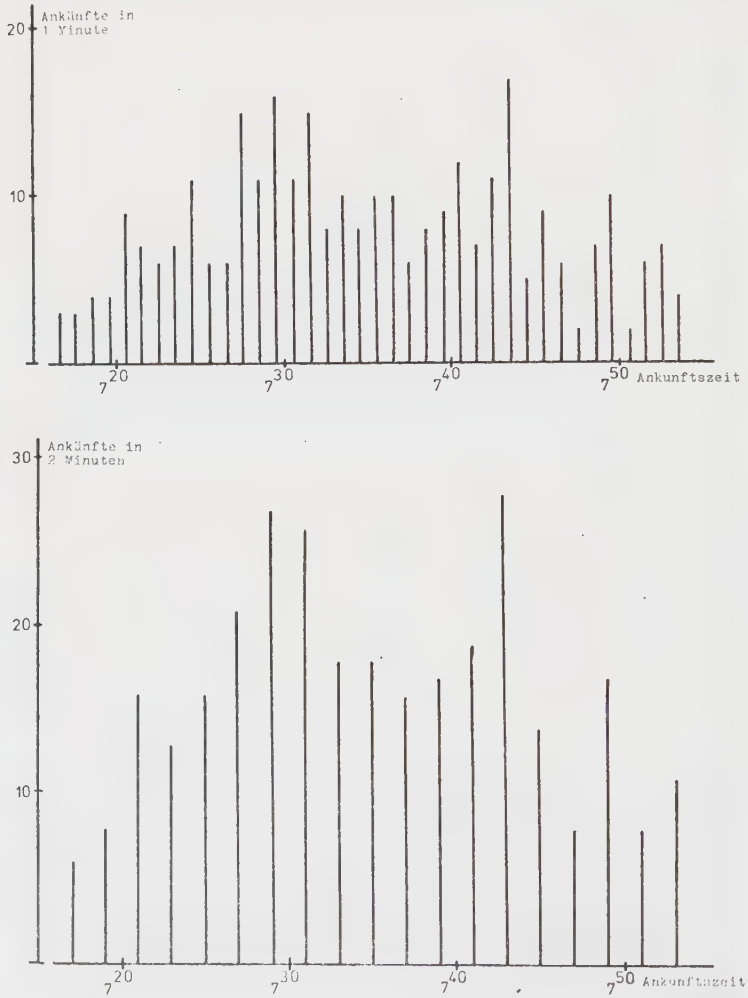


Abb. 3.8: Ankunftsverteilung der Aufzugsbenutzer am 24.4.1972 von 7^{16} - 7^{54} im Erdgeschoß

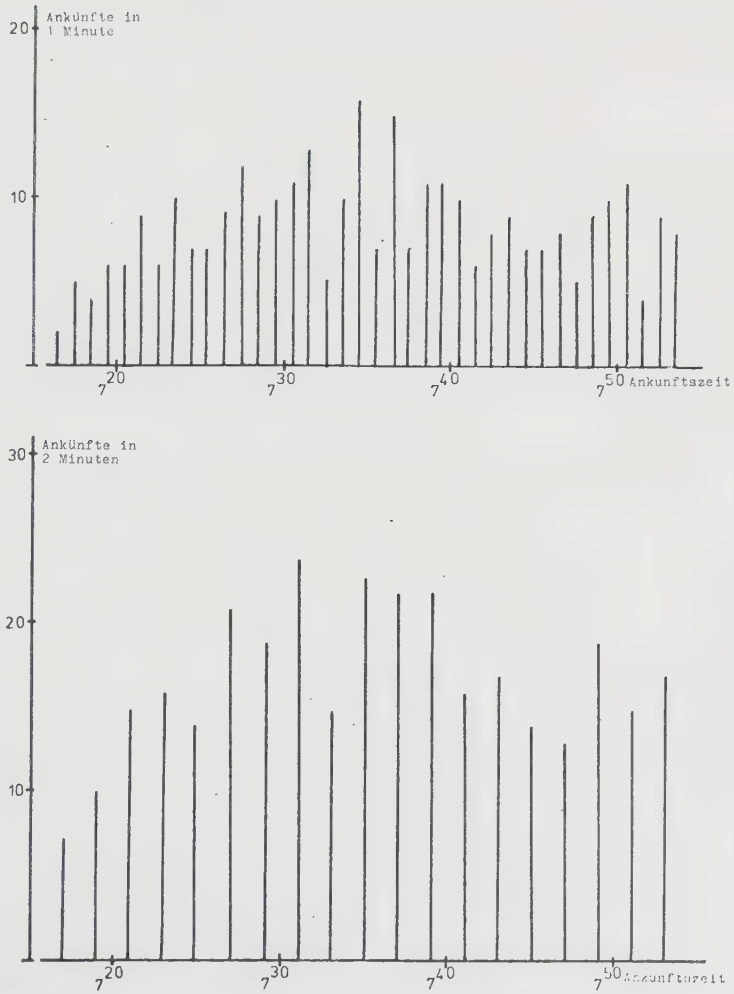


Abb. 3.9: Ankunftsverteilung der Aufzugsbenutzer am 25.4.1972 von $7^{\underline{16}}$ - $7^{\underline{54}}$ im Erdgeschoß

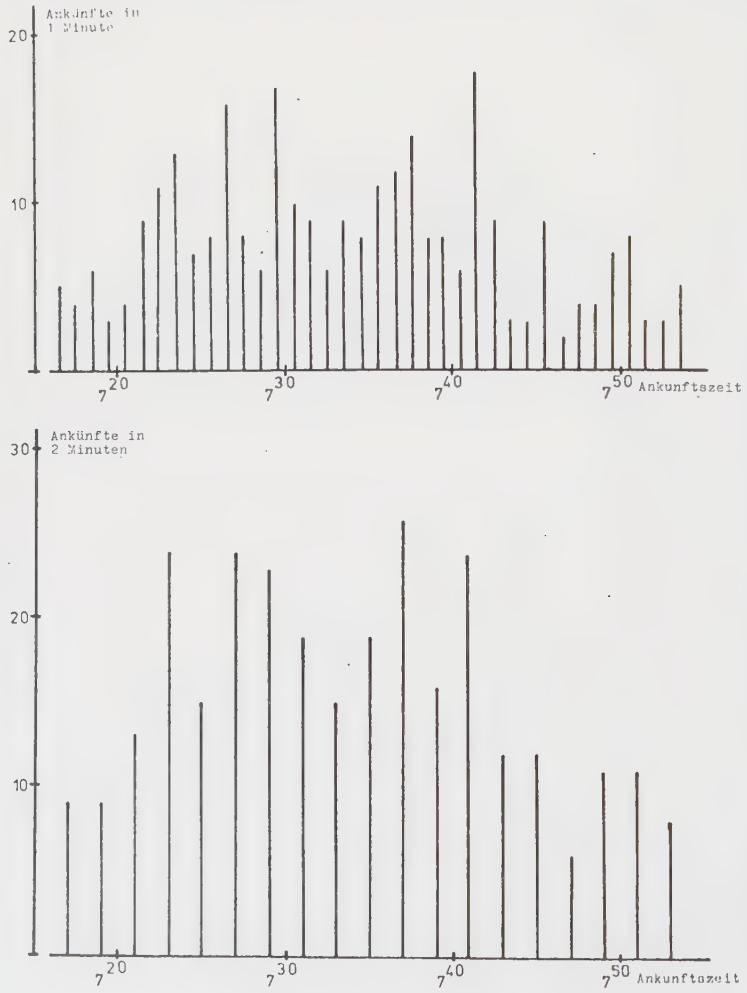


Abb. 3.10: Ankunftsverteilung der Aufzugsbenutzer am 26.4.1972 von $7^{\underline{16}}$ - $7^{\underline{54}}$ im Erdgeschoß

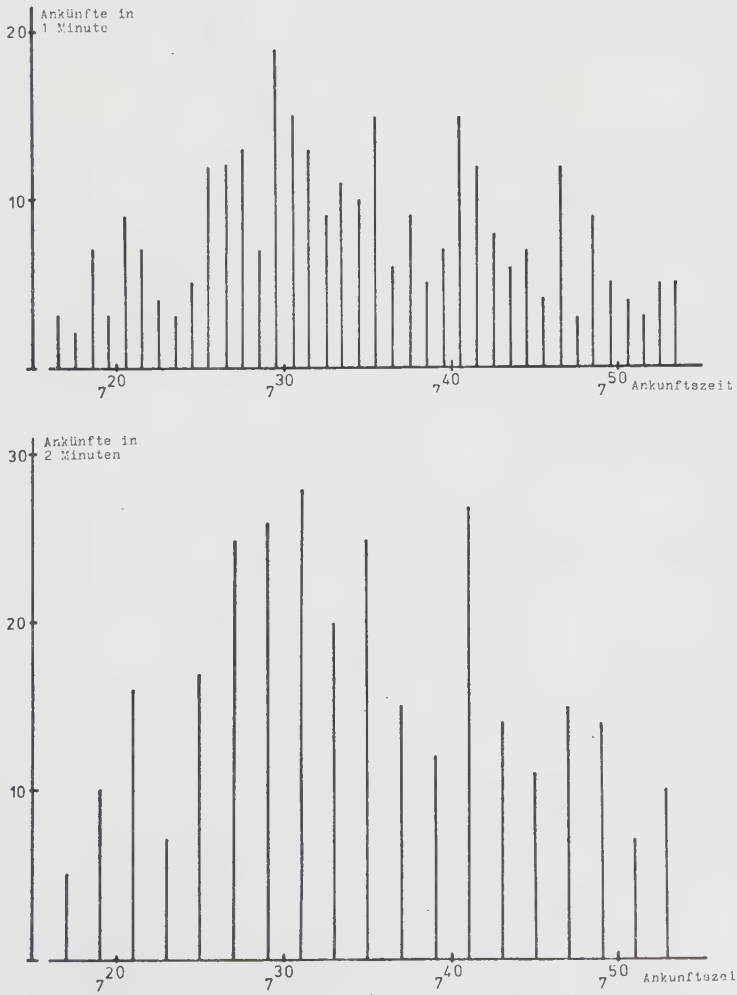


Abb. 3.11: Ankunftsverteilung der Aufzugsbenutzer am 27.4.1972 von $7^{\underline{16}}$ - $7^{\underline{54}}$ im Erdgeschoß

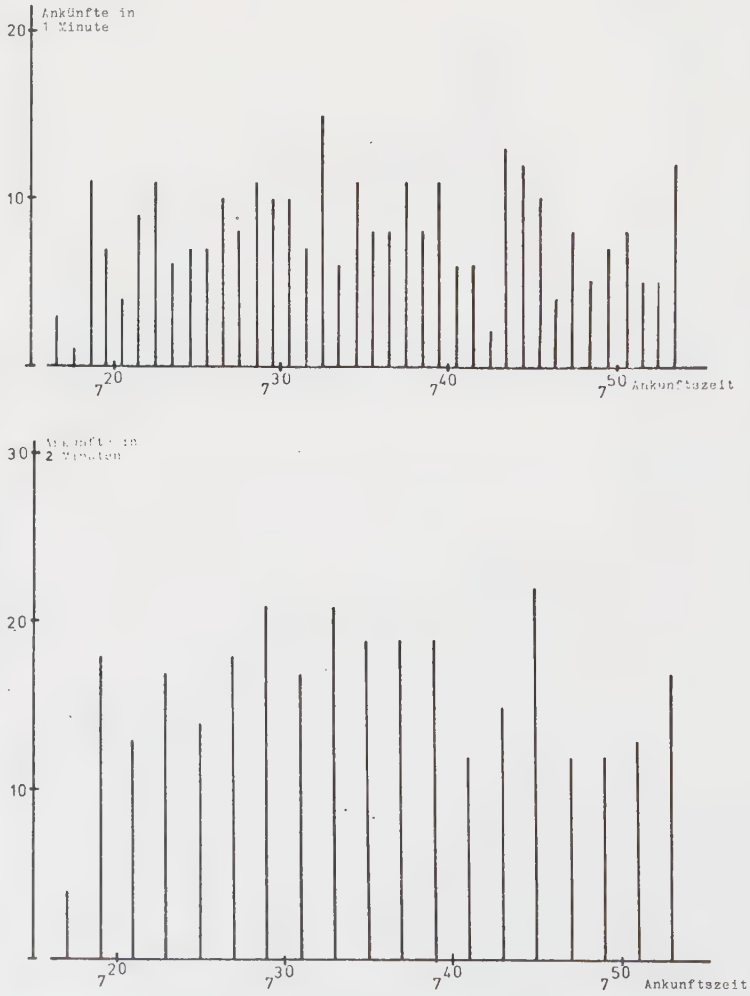
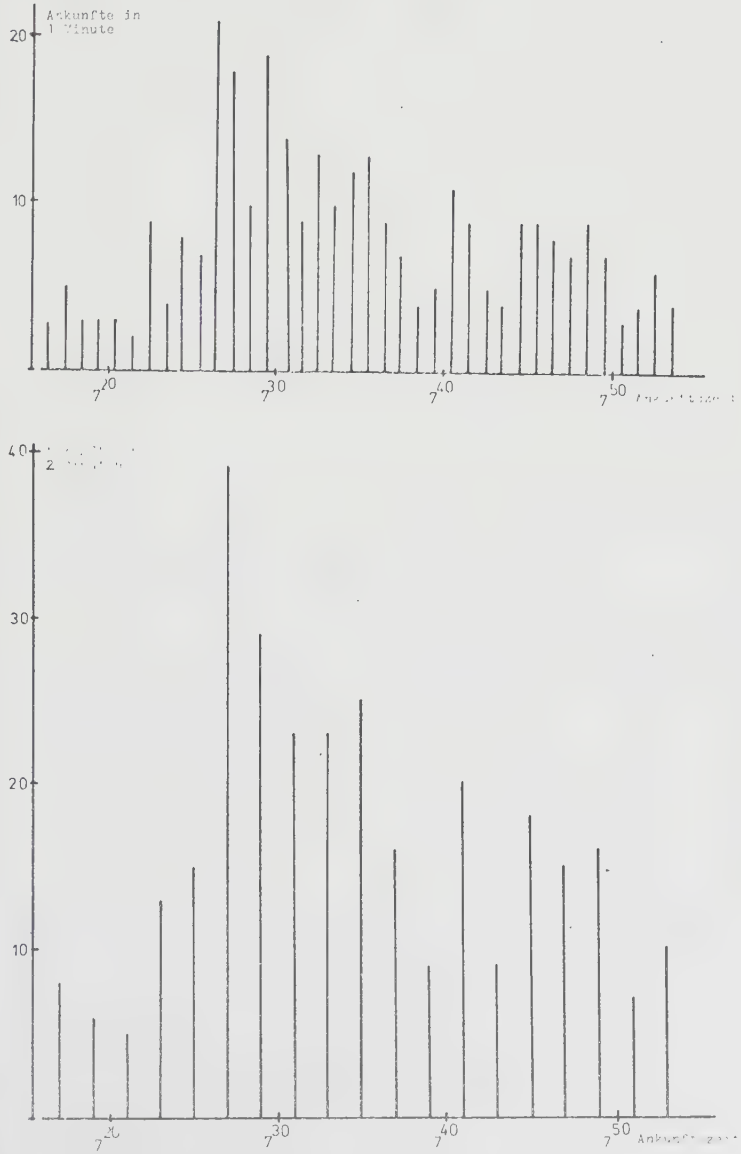


Abb. 3.12: Ankunftsverteilung der Aufzugsbenutzer am 28.4.1972 von 7^{16} - 7^{54} im Erdgeschoß



Tag pro Minute durchschnittlich 5,65 Aufzugbenutzer an - vgl. auch Tab. 3.2 .
Voruntersuchungen zeigten, daß der Verkehr vor $7^{\underline{16}}$ und nach $7^{\underline{54}}$ noch spärlicher floß als während der Spitzenzeit.
Erstaunlich ist, daß während der Beobachtungsperiode pro Tag nur ungefähr 300 Personen die Aufzugsanlage benutzten, das sind 34,78% der Beschäftigten, bzw. 40,76% der Beschäftigten oberhalb des Erdgeschosses. Die gleitende Arbeitszeit scheint in diesem Betrieb also vorweggenommen zu sein. Eine eindeutig abgrenzbare Verkehrsspitze zeigt sich nicht.

Die auf empirischer Grundlage ermittelte und aggregierte Ankunftsverteilung soll nun durch eine theoretische Verteilung approximiert werden. Dafür bietet sich die Poissonverteilung an. Es wird nur die Zeit von $7^{\underline{20}}$ Uhr bis $7^{\underline{46}}$ betrachtet; in dieser Zeit liegt wohl die eigentliche - schwache-Verkehrsspitze.
Wie wegen der zeitlichen Inhomogenität der Ankunftsverteilung während dieser 26 Minuten nicht anders zu erwarten, liefert ein χ^2-Test - s. Tab. 3.3 - kein gutes Ergebnis. Die

Tab. 3.2 : Mittelwerte und durchschnittliche Ankunftsintervalle der aggregierten Teilankunftsverteilungen

Verteilung	Zeitraum	Durchschn. Anzahl Ankünfte pro 15 sec μ	Durchschn. Ankunftsintervall in sec ϱ
I	$7^{\underline{20}}$ - $7^{\underline{26}}$	1,7875	8,3916
II	$7^{\underline{26}}$ - $7^{\underline{32}}$	2,8583	5,2478
III	$7^{\underline{32}}$ - $7^{\underline{38}}$	2,475	6,0606
IV	$7^{\underline{38}}$ - $7^{\underline{46}}$	2,1375	7,0175

Tab. 3.3 : χ^2 - Test für die Approximation der beobachteten Ankunftsverteilung von $7^{\underline{20}}$ bis $7^{\underline{46}}$ durch eine Poissonverteilung mit $\mu = 2{,}3$

Ankünfte in 15 sec	beobachtete absolute Häufigkeiten	theoretisch erwartete absolute Häufigkeiten
0	143	104,312
1	239	239,824
2	248	277,16
3	181	211,432
4	111	121,576
5	62	55,952
6	33	21,424
7	17 } 23	7,072 } 9,776
8	4	für ≥8 2,704
9	2	
≥ 10	0	

$\bar{x} = 2{,}3067$ - durchschnittliche Zahl Ankünfte in 15 sec -

$\chi^2 = 47{,}5174$

Der χ^2 -Vergleichswert aus der Tabelle der χ^2 -Verteilung mit 7 Freiheitsgraden beträgt 14,07; $(1-\alpha) = 0{,}95$.

Hypothese, die Ankunftsverteilung sei poissonverteilt, muß also abgelehnt werden.

Der Beobachtungszeitraum pro Tag wird jetzt in vier Teilbereiche I bis IV unterteilt - s. Tab. 3.2 - und für jeden Bereich wird getestet, ob die Ankunftsverteilung mithilfe einer Poissonverteilung beschrieben werden kann. Die χ^2 - Tests - s. Tab. 3.4 bis 3.7 - zeigen, daß die einzelnen Ankunftsverteilungen für die Teilbereiche durch Poissonverteilungen approximiert werden können, während dies, wie wir oben gesehen haben, für den Gesamtbereich nicht gilt. Dieses Ergebnis steht nicht im Widerspruch zur Reproduktivitätseigenschaft der Poissonverteilung, da hier die Verteilungen interzeitlich aggregiert werden.

Tab. 3.4 : χ^2 - Test für die Approximation der beobachteten Ankunftsverteilung von $7^{\underline{20}}$ bis $7^{\underline{26}}$ durch eine Poissonverteilung mit $\mu = 1{,}7$, $\mu = 1{,}8$ und $\mu = 1{,}9$

Ank. in 15 sec x_i	Beobachtungstag 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	kumul. Werte	theor. erw. abs. Häufigk. für $\mu = 1{,}8$
0	7	5	3	5	3	6	6	7	3	7	52	39,67
1	8	6	7	6	6	5	4	5	8	8	63	71,4
2	2	7	8	6	10	5	3	6	8	5	60	64,27
3	2	3	4	4	2	4	5	3	2	2	31	38,75
4	4	2	-	3	2	3	4	1	2	1	22	17,35
5	-	1	1	-	1	-	1	2	-	1	7	} 8,74
6	1	-	1	-	-	1	1	-	1	-	5	
≥ 7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

$\bar{x} = 1{,}7875$ $\quad \sigma^2_x = 2{,}1757$ $\quad$ 5 Freiheitsgrade

$\mu = 1{,}7$ $\quad \chi^2 = 10{,}499$ $\quad 0{,}9 < 1-\alpha < 0{,}95$

$\mu = 1{,}8$ $\quad \chi^2 = 9{,}05$ $\quad 0{,}8 < 1-\alpha < 0{,}9$

$\mu = 1{,}9$ $\quad \chi^2 = 10{,}944$ $\quad 0{,}9 < 1-\alpha < 0{,}95$

Tab. 3.5 : χ^2 - Test für die Approximation der beobachteten Ankunftsverteilung von $7^{\underline{26}}$ bis $7^{\underline{32}}$ durch eine Poissonverteilung mit $\mu = 2{,}8$, $\mu = 2{,}9$ und $\mu = 3{,}0$

Ank. in 15 sec x_i	Beobachtungstag 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	kumul. Werte	theor. erw. abs. Häuf. für $\mu = 2{,}9$
0	-	3	3	2	1	-	3	2	3	-	17	13,2
1	4	5	4	8	4	6	3	2	3	3	42	38,3
2	6	6	7	2	7	4	6	5	6	5	54	55,53
3	5	4	3	4	3	9	6	5	9	5	53	53,69
4	3	2	3	6	5	5	2	4	1	2	33	38,93
5	4	3	1	2	-	-	1	3	2	3	19	22,56
6	1	-	2	-	1	-	1	2	-	2	9	10,92
7	1	1	1	-	3	-	2	-	-	3	11	} 6,89
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
9	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	2	
≥ 10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

$\bar{x} = 2{,}8542$ $\qquad \sigma^2_x = 3{,}3664$ $\qquad$ 7 Freiheitsgrade

$\mu = 2{,}8$ $\qquad \chi^2 = 10{,}2$ $\qquad 0{,}8 < 1-\alpha < 0{,}9$

$\mu = 2{,}9$ $\qquad \chi^2 = 8{,}72$ $\qquad 0{,}7 < 1-\alpha < 0{,}8$

$\mu = 3{,}0$ $\qquad \chi^2 = 9{,}49$ $\qquad 0{,}7 < 1-\alpha < 0{,}8$

Tab. 3.6 : χ^2 - Test für die Approximation der beobachteten Ankunftsverteilung von $7^{\underline{32}}$ bis $7^{\underline{38}}$ durch eine Poissonverteilung mit $\mu = 2{,}4$, $\mu = 2{,}5$, $\mu = 2{,}6$ und $\mu = 2{,}7$

Ank. in 15 sec x_i	Beobachtungstag 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	kumul. Werte	theor. erw. abs. Häuf. für $\mu = 2{,}6$
0	4	4	2	2	2	3	1	1	2	2	23	17,83
1	4	4	2	8	6	5	7	8	7	3	54	46,34
2	3	3	8	5	8	6	4	4	3	7	51	60,24
3	3	5	6	3	5	3	8	4	6	5	48	52,22
4	2	2	2	4	1	4	1	4	4	6	30	33,94
5	6	1	2	2	1	1	2	2	1	-	18	17,64
6	2	4	2	-	1	1	-	1	-	1	12	}
7	-	1	-	-	-	1	1	-	1	-	4	} 11,78
≥ 8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	}

$\bar{x} = 2{,}5417$ $\quad \sigma^2_x = 2{,}907$ $\quad$ 6 Freiheitsgrade

$\mu = 2{,}4$	$\chi^2 = 9{,}73$	$0{,}8 < 1-\alpha < 0{,}9$
$\mu = 2{,}5$	$\chi^2 = 6{,}87$	$0{,}5 < 1-\alpha < 0{,}7$
$\mu = 2{,}6$	$\chi^2 = 6{,}49$	$0{,}5 < 1-\alpha < 0{,}7$
$\mu = 2{,}7$	$\chi^2 = 9{,}37$	$0{,}8 < 1-\alpha < 0{,}9$

Tab. 3.7 : χ^2 - Test für die Approximation der beobachteten Ankunftsverteilung von $7^{\underline{38}}$ bis $7^{\underline{46}}$ durch eine Poissonverteilung mit $\mu = 2{,}0$, $\mu = 2{,}1$, $\mu = 2{,}10938$ u. $\mu = 2{,}2$

Ank. in 15 sec x_i	Beobachtungstag 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	kumul. Werte	theor. erw. abs. Häuf. für μ=2,10938
0	6	7	4	5	4	3	5	4	6	7	51	38,82
1	5	8	7	5	7	9	10	10	7	12	80	81,88
2	7	9	9	10	8	9	8	9	9	5	83	86,34
3	5	3	5	4	7	5	5	4	6	5	49	60,69
4	4	3	4	3	2	4	1	3	1	1	26	32,02
5	3	-	3	3	2	1	2	1	2	1	18	13,5
6	2	1	-	2	-	1	-	-	1	-	7	}
7	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	2	}6,76
8	-	1	-	-	2	-	1	-	-	-	4	}
≥9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	}

$\bar{x} = 2{,}10938$ $\quad \sigma^2_x = 2{,}816$ $\quad$ 6 Freiheitsgrade

$\mu = 2{,}0$	$\chi^2 = 18{,}36$	$0{,}99 < 1-\alpha < 0{,}999$
$\mu = 2{,}1$	$\chi^2 = 15{,}01$	$0{,}95 < 1-\alpha < 0{,}98$
$\mu = 2{,}10938$	$\chi^2 = 14{,}56$	$0{,}95 < 1-\alpha < 0{,}98$
$\mu = 2{,}2$	$\chi^2 = 15{,}86$	$0{,}98 < 1-\alpha < 0{,}99$

Bei allen Teilankunftsverteilungen ist die Varianz größer als der Mittelwert. Deshalb ist es von vorneherein nicht sinnvoll, diesen Verteilungen nur Poissonverteilungen mit jeweils dem gleichen Mittelwert gegenüberzustellen,und es wird jede Verteilung gegenüber Poissonverteilungen mit mehreren Mittelwerten getestet.

Im Bereich I ist zur Approximation am besten eine Poissonverteilung mit $\mu = 1{,}8$ geeignet - vgl. Tab. 3.4 . Das Signifikanzniveau liegt zwischen 20 % und 10 % .

Im Bereich II eignet sich am besten eine Poissonverteilung mit $\mu = 2{,}9$ - vgl. Tab. 3.5 . Das Signifikanzniveau liegt zwischen 20 % und 30 %. Auch bei einem μ von 3,0 ist die Poissonverteilung gut zur Approximation geeignet. Die im Vergleich zum Mittelwert größere Varianz der empirischen Verteilung bewirkt offenbar, daß $\mu_{poisson} > \bar{x}_{empirisch}$ wird.

Im Bereich III liegt sowohl bei $\mu = 2{,}5$ als auch bei $\mu = 2{,}6$ das Signifikanzniveau über 30 % - vgl. Tab. 3.6 . Der berechnete χ^2 - Wert ist bei $\mu = 2{,}6$ allerdings etwas besser.

Im Vergleich zu den anderen Bereichen ist die Approximation durch eine Poissonverteilung in der Zeit von $7\frac{38}{}$ bis $7\frac{46}{}$ - Bereich IV - am schlechtesten. Bei $\mu = 2{,}1$ liegt $(1 - \alpha)$ zwischen 95 % und 98 % - vgl. Tab. 3.7. Bei einer Approximation durch eine Poissonverteilung mit einem μ, das genau dem Mittelwert der empirischen Verteilung entspricht, wird der χ^2 - Wert etwas besser, das Signifikanzniveau ist aber immer noch kleiner als 5 %.

Diese Vergleiche der empirischen Verteilungen mit theoretischen Verteilungen werden deshalb vorgenommen, weil im Verlauf der Untersuchung später die Stärke des Verkehrsstromes variiert werden soll.

Diese Variation der Ankunftsintensität ist mithilfe einer theoretischen Verteilung sehr viel einfacher zu simulieren als mit einer empirischen, da nur die Parameter dieser Verteilung variiert zu werden brauchen. Die Annahme poissonverteilter Ankünfte an Schaltern ist wegen der Eigentümlichkeiten des Poissonprozesses sehr naheliegend[1].

Die einzige Untersuchung der Ankunftsverteilung von Benutzern einer Aufzugsanlage, die dem Verfasser bekannt ist, wurde in Japan von I.Inuzuka und T.Ochi vorgenommen[2]. Die Ankunftsverteilung in einem Gebäude in Tokio wurde während der Aufspitze untersucht. Das Gebäude liegt in der Nähe von Stationen der japanischen staatlichen Eisenbahn, privater Eisenbahnen, Straßenbahn,anderer elektrischer Bahnen und Bussen. Auf den Hauptstraßen, die zu diesem Gebäude führen,gibt es viele Ampeln.Wegen dieser Gegebenheiten ist es naheliegend, daß es sehr viele Gruppenankünfte geben wird.

Die Untersuchung wurde an zwei aufeinanderfolgenden Tagen mithilfe von Filmkameras durchgeführt, die an mehreren Eingängen des Gebäudes aufgestellt wurden. Gemessen wurde während eines Zeitraumes von einer halben Stunde morgens.

Die empirische Ankunftsverteilung wurde mit einem χ^2 - Test gegen eine Poissonverteilung getestet. Die Approximation durch diese Verteilung war nicht gut, abgelehnt konnte sie jedoch nicht werden[3].

---

[1] Vgl. hierzu Thomas L. Saaty, Elements of queueing theory, New York, Toronto, London 1961, S. 33-38

[2] Isao Inuzuka und Toshio Ochi,Transportation Capacity of Elevators for Multistoried Buildings. In: Hitachi Review, vol. 15, nr. 5, Tokyo 1966, S. 178 - 186

[3] Angaben über das Signifikanzniveau wurden nicht gegeben.

Es wurde schließlich der Funktionstyp einer zusammengesetzten Exponentialverteilung für die theoretische Verteilung der Ankunftsintervalle zugrundegelegt, und zwar der Form

$$g(t) = 1/2\left(\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}\right) .$$

Die Parameter λ_1 und λ_2 wurden über die χ^2 - Minimum - Methode bestimmt.
Diese Verteilung lieferte eine bessere Approximation als die einfache Exponentialverteilung. Das durchschnittliche Ankunftsintervall lag während der absoluten Spitze bei 1,5 sec, danach bei 2 bis 2,5 sec.

Die Verhältnisse in Münster sind dagegen ganz anderer Art. Das betrachtete Gebäude liegt nicht inmitten einer Weltstadt mit zahlreichen Verkehrsanbindungen, sondern in einer Nebenstraße außerhalb der City. Eine Bushaltestelle ist etwa 200 Meter entfernt, sonst befinden sich keine Stationen öffentlicher Verkehrsmittel in der näheren Umgebung.
Eine Fußgängerampel liegt etwa 100 Meter vom Haupteingang entfernt. Die Beschäftigten kamen meistens einzeln in das Gebäude, Gruppenbildung wurde nur kurz vor Eintreffen in den eigentlichen Warteraum vor den Aufzügen beobachtet, wenn sich etwa Kollegen begrüßten.
Leider standen dem Verfasser keine besonderen technischen Hilfsmittel und nur wenige Zähler zur Verfügung, sodaß die Ankunftsintervalle nicht selbst bestimmt werden konnten, wie in der japanischen Untersuchung, sondern nur die Zahl der Ankünfte pro vorgegebenem Zeitintervall.
Des weiteren war die durchschnittliche Verkehrsintensität in Münster beträchtlich geringer als die in dem Gebäude in Tokio - vgl. Tab. 3.2 .

3.2 Die Zielverteilung

Für die Verteilung der Ziele der Aufzugbenutzer kann nicht einfach die Zahl der Beschäftigten in den einzelnen Etagen - siehe Tab. 3.8 - herangezogen werden, da die Zahl und das Verhalten der Treppenbenutzer nicht außer acht gelassen werden darf. Um die prozentuale Aufteilung der Fahrstuhlbenutzer auf die einzelnen Etagen festzustellen, müssen deshalb in den Stockwerken die aussteigenden Fahrgäste gezählt werden. Eine Befragung der Fahrgäste im Erdgeschoß verbietet sich aus organisatorischen Gründen.

Tab. 3.8 : Die Aufteilung der Belegschaft auf die Stockwerke

Stockwerk	Zahl der Beschäftigten
Keller	-
Untergeschoß	20
Erdgeschoß	106
1	73
2	78
3	82
4	97
5	72
6	65
7	82
8	63
9	76
10	45
Summe	859

Die Aussteiger wurden nur bis zum 5. Stockwerk gezählt, weil angenommen wurde, daß von den Belegschaftsmitgliedern

der höheren Stockwerke praktisch niemand mehr die Treppen benutzt.
Die Ergebnisse der Zählungen sind in Tab. 3.9 dargestellt.

Tab. 3.9 : Prozentanteile der Aussteiger bis Stockwerk 5

Stockwerk	Anteil Aussteiger in %
Keller	-
Untergeschoß	-
Erdgeschoß	-
1	-
2	7,07
3	10,87
4	15,94
5	11,2

Wie erwartet,benutzte niemand den Aufzug, um in den Keller zu gelangen. Daß niemand in das Untergeschoß fuhr, liegt wohl daran, daß dort auch ein Eingang besteht. Nicht erwartet hat der Verfasser dagegen, daß alle Beschäftigten des ersten Stockwerkes die Treppenbenutzung der Inanspruchnahme der Aufzuganlage vorzogen.[1]

Die Plausibilität des Abbrechens der Zählungen vom 6. Stockwerk an wird durch ein Näherungsverfahren überprüft:
Es ist wohl anzunehmen, daß der Anteil der Treppenbenutzer an der Zahl der Beschäftigten pro Stockwerk mit zunehmender Stockwerkzahl abnimmt.
Unterstellt man, daß n i e m a n d der Gesamtbelegschaft ab Stockwerk 2 die Treppen benutzt, sind in Stockwerk 2

[1] Im 1. Stockwerk stieg am 2. Beobachtungstag eine Person aus, der Benutzer kam jedoch aus einem anderen höheren Stockwerk - interner Verkehr .

78 / 660 = 11,818 % Aussteiger zu erwarten- statt, wie gezählt, 7,07 %[1]. Dieser erwartete Wert wäre noch höher, wenn irgendjemand ab Stockwerk 3 zu Fuß gehen würde, da der Nenner des Bruches kleiner würde.

Für Stockwerk 3 wären, wenn 7,07 % - also der empirische Wert - nach 2 fahren und niemand ab 3 die Treppen benutzt, 13,09 % Aussteiger zu erwarten[2]. Auch dieser Prozentsatz liegt über dem gemessenen, weil eben nach 3 einige Personen zu Fuß gehen.

Für Stockwerk 4 ergibt sich als erwarteter Wert 15,92 %.[3] Der gemessene Wert liegt sogar noch darüber. Es steigen also nach den Messungen mehr Personen in Stockwerk 4 aus als zu erwarten wären, wenn niemand in den höheren Stockwerken zu Fuß ginge. Dieser Unterschied dürfte jedoch ebensowenig signifikant sein wie der, der sich im 5. Stockwerk ergibt. Hier liegt der erwartete Wert mit 11,82 % etwas über dem gemessenen Wert[4].

---

[1] 660 = 859 - 20 - 106 - 73

[2] 0,1309 = (1 - 0,0707) 82 / 582
582 = 660 - 78

[3] 0,1592 = (1 - 0,0707 - 0,1087) 97 / 500
500 = 582 - 82

[4] 0,1182 = (1 - 0,0707 - 0,1087 - 0,1592) 72 / 403
403 = 500 - 97

Allgemein lautet der Ansatz für die Berechnung der erwarteten Werte :

$$f_j = \frac{b_j}{\sum_{i=j}^{n} b_i} \left(1 - \sum_{i=1}^{j-1} f_i\right).$$

b_j = Beschäftigte in Stockw. j
f_j = Anteil Aussteiger in j
n = Anzahl Geschosse

Tab. 3.10 : Die empirische Zielverteilung

Stockwerk	Aussteiger in % f_i	Kumulierte Häufigk. F_i in %
Keller	-	-
Untergeschoß	-	-
Erdgeschoß	-	-
1	-	-
2	7,07	7,07
3	10,87	17,94
4	15,92	33,86
5	11,82	45,68
6	10,67	56,35
7	13,46	69,80 +
8	10,34	80,14
9	12,47	92,62 +
10	7,39	100 +

In die empirische Zielverteilung - Tab. 3.10 - gehen bis zum dritten Stockwerk die erhobenen Meßwerte ein, während ab Stockwerk 4 die erwarteten Werte nach- 3.1 - bestimmt werden.
Grundlage für die Simulation ist die Verteilungsfunktion der Ziele - vgl. Tab. 3.10 .
Möchte man die absolute Zahl der Fußgänger pro Stockwerk aus den Werten der Tab. 3.10 ermitteln, so führt das auf ein lineares Gleichungssystem mit n - Anzahl Zielstockwerke - Gleichungen:

+ Die Unterschiede ergeben sich durch Rundungsfehler bei den f_i. Im Simulationsprogramm wird mit höherer Genauigkeit gerechnet.

$$f_j = \frac{b_j - fu_j}{\sum_{i=1}^{n} b_i - \sum_{i=1}^{n} fu_i}$$

für $j = 1, \ldots, n$ - 3.2 -

fu_j = Anzahl Fußgänger nach j

In unserem Fall hat sich durch die Näherungslösung ergeben, daß ab Stockwerk 4 niemand mehr die Treppen benutzt. Deshalb läßt sich hier das Gleichungssystem zu zwei Gleichungen reduzieren, nämlich :

$$\frac{b_2 - fu_2}{\sum_{i=1}^{n} b_i - \sum_{i=1}^{n} fu_i} = f_2 \qquad \text{und}$$

$$\frac{b_3 - fu_3}{\sum_{i=1}^{n} b_i - \sum_{i=1}^{n} fu_i} = f_3$$

Setzt man die Werte numerisch ein, ergibt sich :

$$\frac{78 - fu_2}{859 - 20 - 106 - 73 - fu_2 - fu_3 - 0} = 0{,}0707 \qquad \text{und}$$

$$\frac{82 - fu_3}{660 - fu_2 - fu_3} = 0{,}1087 \quad .$$

Die Lösung lautet : $fu_2 = 34{,}90$ und $fu_3 = 15{,}76$.
Es gehen also ungefähr 35 Personen zu Fuß ins zweite Stockwerk und ungefähr 16 ins dritte. Das bedeutet, daß 55,26 % der Beschäftigten des zweiten Stockwerkes und 80,77 % des dritten Stockwerkes die Aufzugsanlage in Anspruch nehmen. Diese Werte sind natürlich Punktschätzwerte, da die Daten ja auf Stichprobenbasis erhoben wurden.

4 Der Aufbau der Simulationsprogramme

4.1 Die Simulation des Verkehrs

4.1.1 Die Simulation der Ankunftsverteilungen und der Zielverteilung auf Grundlage der empirischen Erhebungen

Den ersten vier Modellen liegen die empirisch erhobenen Ankunftsverteilungen von $7^{\underline{20}}$ Uhr bis $7^{\underline{26}}$ - Modell I , $7^{\underline{26}}$ bis $7^{\underline{32}}$ - Modell II , $7^{\underline{32}}$ - $7^{\underline{38}}$ - Modell III - und $7^{\underline{38}}$ bis $7^{\underline{46}}$ - Modell IV - zugrunde.

In Tab. 41 sind die Verteilungsfunktionen für die Ankunftsverteilungen zusammengestellt, die Verteilungsfunktion der empirischen Zielverteilung ist wie schon erwähnt in Tab. 3.10 dargestellt.
Als Beispiel für das Vorgehen bei der Simulation soll Modell I dienen :
Eingelesen werden als Daten die Verteilungsfunktionen der Ankünfte und der Ziele.
Es wird eine zwischen 0 und 1 gleichverteilte Pseudozufallszahl U erzeugt[1] und abgefragt, ob sie kleiner ist als $o,21\overline{6}$. Falls dies zutrifft, heißt das, daß in den nächsten 15 sec niemand kommt. Die Simulationsuhr wird um 15 sec vorgestellt - absolute Simulationszeit; die Zeit, die seit Eintreffen des letzten Benutzers vergangen

[1] Die Pseudozufallszahlen werden mithilfe der Subroutine Randu des IBM- SSP erzeugt.

ist - relative Simulationszeit, wird ebenfalls um 15 sec erhöht. Diese Prozedur wiederholt sich solange, bis eine Zufallszahl gebildet wird, die nicht kleiner ist als 0,21$\overline{6}$.

Tab. 4.1 : Verteilungsfunftionen der Ankunftsverteilungen der Modelle der Gruppe I

Ankünfte in 15 sec	Modell			
	I	II	III	IV
0	0,21$\overline{6}$	0,24583	0,09583	0,159375
1	0,47916	0,47083	0,32083	0,409375
2	0,72916	0,6916	0,53	0,66875
3	0,8583	0,82916	0,73	0,821875
4	0,94$\overline{9}$	0,9083	0,8583	0,903125
5	0,97916	0,94583	0,93	0,959375
6	1	0,9916	0,983	0,98125
7		0,9916	1	0,9875
8		1		1

Es folgt nun die Abfrage, ob diese Zufallszahl kleiner ist als 0,47916. Trifft dies zu, heißt das, daß in den nächsten 15 sec 1 Person ankommt, falls nicht, wird abgefragt, ob $U < 0{,}72916$ ist. Diese Schleife wird bei Bejahung einer Abfrage abgebrochen. Ist z. B. U = 0,821356, dann treffen in dem nächsten Zeitintervall 3 Personen ein.

Das nächste zu lösende Problem ist, wie diese drei Aufzugbenutzer innerhalb dieser 15 sec ankommen. Man könnte hier ein stochastisches Modell benutzen, also etwa eine Poisson- oder Gleichverteilung für die Ankunftsverteilungen innerhalb der Beobachtungsintervalle simulieren, oder auch deterministisch die Ankunftsintervalle bestimmen - etwa :

$dt = 15\ [sec] / 3 = 5\ [sec]$. dt = Ankunftsintervall der nächsten 3 Personen

Dieses deterministische Modell wäre wohl einfach aber sicher nicht wirklichkeitsnah.
Es wird stattdessen wieder eine Simulation vorgenommen, wobei von einer modifizierten Gleichverteilung ausgegangen wird. Bei den empirischen Erhebungen wurde bei den Ankünften öfters eine Klumpenbildung beobachtet. Diese Gruppierungen der Ankünfte könnten durch eine einfache Gleichverteilung nicht gut approximiert werden. Es wird folgendermaßen vorgegangen:
Eine zwischen 0 und 1 gleichverteilte Pseudozufallszahl U wird erzeugt und ein Ausgangszeitintervall DZT gleich 15 sec gesetzt. Das Produkt UxDZT wird zu der relativen Simulationszeit, also der Zeit, die bis jetzt seit Eintreffen des letzten Benutzers im vorherigen Zeitintervall verstrichen ist, addiert, die Summe ergibt das Ankunftsintervall zwischen der letzten und der betrachteten Person.
Von DZT wird UxDZT subtrahiert, es bleibt ein Rest, der wiederum DZT genannt wird. Dieses Verfahren wiederholt sich mit n - im Beispiel n = 3 - Zufallszahlen.
Ein Beispiel:
Im letzten Zeitintervall sei der letzte Benutzer 2 sec vor Schluß angekommen. Eine Zufallszahl - U = 0,15 - wird erzeugt : Das bedeutet, daß in den nächsten 15 sec niemand eintrifft - siehe Tab. 4.1, Modell I . Das folgende U sei 0,81, in dem darauf folgenden Zeitintervall kommen 3 Personen an. Jetzt müssen die einzelnen Ankunftsintervalle bestimmt werden : Die nächste Zufallszahl sei 0,3, d.h. der erste Benutzer kommt in diesem Intervall nach 0,3 x 15 = 4,5 sec. Das Ankunftsintervall zum letzten Benutzer beträgt 2 + 15 + 4,5 = 21,5 sec. Für die nächsten zwei Benutzer bleiben noch 15 - 4,5 = 10,5 sec. Die nächste Zufallszahl sei 0,1, der zweite Besucher kommt also 0,1 x 10,5 = 1,05 sec später, für den dritten bleiben noch 9,45 sec. Ist die folgende Zufallszahl 0,9, dann beträgt das nächste Ankunftsintervall 0,9x9,45 = 8,505 sec, es

bleiben noch 9,45 - 8,505 = 0,945 sec, die zum ersten Ankunftintervall im nächsten Zeitintervall addiert werden. Durch diese Simulation entsteht eine leichte Tendenz zu gehäufteren Ankünften am Ende der jeweiligen betrachteten Zeitintervalle.

Die Simulation der Zielstockwerke der Benutzer ist einfacher. Für den Benutzer wird wieder eine zwischen 0 und 1 gleichverteilte Pseudozufallszahl erzeugt und abgefragt, ob sie kleiner ist als 0,070739 - vgl. Tab. 3.10. Trifft dies zu, möchte der Benutzer zum Stockwerk 2 fahren, falls nicht, folgt nun die Abfrage,ob die Zufallszahl kleiner ist als 0,1794, usw.,bis ihm ein Zielstockwerk zugewiesen werden kann.

4.1.2 Die Simulation der theoretischen Verteilungen

Bei der Simulation der Ankunftsverteilungen auf Grundlage der empirischen Messungen wurde so vorgegangen, daß zunächst die Zahl der Aufzugsbenutzer pro vorgegebenem Zeitintervall simuliert wurde und danach in einem zweiten Simulationsschritt die Ankunftsintervalle der Benutzer bestimmt wurden. Dieses Verfahren war aus erhebungstechnischen Gründen erforderlich[1].

Für die theoretischen Ankunftsverteilungen werden Poissonverteilungen simuliert. Es wäre aber simulationstechnisch ungeschickt, im Simulationsprogramm mit der Verteilungsfunktion der Poissonverteilung zu arbeiten, da sich als Ergebnis zunächst nur die Zahl der Ankünfte pro vorgegebenem Zeitintervall ergäbe. Die Ankunftsintervalle selbst müßten wiederum in einem zweiten Simulationsschritt bestimmt werden. Es können vielmehr die Ankunftsintervalle direkt simuliert werden, da sie selbst exponentialverteilt sind, wenn die Ankünfte poissonverteilt sind[2].

---

[1] Vgl. hierzu S. 32

[2] Vgl. Thomas L. Saaty, Elements of queueing theory, New York, Toronto, London 1961, S. 33 ff

Es läßt sich nämlich zeigen, daß die Verteilungsfunktion $F(DT)$ für die Ankunftsintervalle DT unter der Voraussetzung poissonverteilter Ankünfte eine Exponentialverteilung folgender Form ist[1]:

$F(DT) = W(DT \leq dt) = 1 - e^{-\lambda dt}$. In diese Verteilungsfunktion wird bei der Simulation die zwischen 0 und 1 gleichverteilte Pseudozufallszahl U eingesetzt . Es ergibt sich also:

$U = 1 - e^{-\lambda dt}$. Durch Umformung und nachfolgendes Logarithmieren folgt:

$-\lambda dt = \ln(1 - U)$. Daraus ergibt sich:

$dt = -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - U)$ oder $dt = -\frac{t}{\mu} \ln(1 - U)$. - 4.1 -

Aus - 4.1 - wird im Simulationsablauf direkt ein konkretes Ankunftsintervall dt simuliert, nachdem die Pseudozufallszahl U gebildet wurde. Vorgegeben wird vor der Simulation der Ankunftsverteilung nur die durchschnittliche Ankunftsrate λ.

Bei der Verteilung der Ziele der Aufzugbenutzer wird in späteren Modellen von einer Gleichverteilung ausgegangen. Die Stockwerkformel lautet:

$I = (U + 0{,}1)\,10$. - 4.2 -

---

[1] Die Symbole sind im folgenden definiert:

DT : Ankunftsintervall - Zufallsvariable

dt : Ankunftsintervall - konkrete Ausprägung

t : Zugrundeliegendes Zeitintervall - im Simulationsprogramm 15 sec

U : wie stets definiert als zwischen 0 und 1 gleichverteilte Pseudozufallszahl

μ: Parameter der Poissonverteilung - durchschnittliche Zahl von Ankünften in t

λ: durchschnittliche Ankunftsrate - $\lambda = \mu / t$.

I, eine Integer-Variable, gibt das Zielstockwerk an. Wenn beispielsweise die Zufallszahl U = 0,812 erzeugt wird, ergibt sich als Zielstockwerk:
I = 0,912 x 10 = 9,12 - der Benutzer möchte in das 9. Stockwerk.

4.2 Die Simulation der Aufzugssteuerungen

4.2.1 Die Simulation der Zonensteuerung

Bei der Zonensteuerung müssen jedem Aufzug der Anlage bestimmte Zieletagen zugewiesen werden.
Eine o p t i m a l e Zuordnung der Etagen zu einer vorgegebenen Anzahl von Aufzügen stellt wegen der immensen Zahl von Möglichkeiten ein kaum lösbares Problem. Man kann allerdings einige typische Organisationsformen herausgreifen und sie - etwa durch Simulation - vergleichen. Dieses Zuordnungsproblem ist in der vorliegenden Arbeit ausgeklammert worden, der Verfasser hat a priori bei jeder betrachteten Zahl von Aufzügen eine bestimmte Verteilung der Etagen auf die Aufzüge vorgenommen. An einem Beispiel soll allerdings dargestellt werden, wieviel Zuordnungsmöglichkeiten realisiert werden könnten.
In dem Gebäude sollen sich 10 Etagen über dem Erdgeschoß befinden, das Aufzugssystem bestehe aus 5 Aufzügen.
Jeder Aufzug soll mindestens eine Etage bedienen, es darf bei der Bedienung keine Überlappungen geben, und es soll nicht nach Aufzügen unterschieden werden; es soll also gleichgültig sein, ob z.B. Aufzug A oder Aufzug B Etage 5 bedient.
Das Zuteilungsproblem läßt sich auch so formulieren:
Auf wieviel Arten läßt sich die Menge der 10 Etagen in 5 Teilmengen aufteilen, wobei die Teilmengen disjunkt

und nicht leer sind.

In Tab. 4.2 sind die verschiedenen Organisationstypen dargestellt, in Tab. 4.3 die Zahl der Möglichkeiten für die einzelnen Organisationstypen.

Tab. 4.2 : Organisationstypen für die Zonensteuerung bei 10 Zieletagen und 5 Aufzügen

Zahl der Bed.Etagen pro Aufzug	Organisationstyp I	II	III	IV	V	VI	VII
1	4	3	3	2	2	1	-
2	-	1	-	2	1	3	5
3	-	-	1	-	2	1	-
4	-	-	1	1	-	-	-
5	-	1	-	-	-	-	-
6	1	-	-	-	-	-	-
Σ	5	5	5	5	5	5	5

Zu 4.2: Die Zahlen im inneren Tabellenfeld geben die Zahl der Aufzüge an, die 1, 2 oder mehr Etagen bedienen. Es ergeben sich 7 Organisationstypen.

Zu 4.3:
Die Berechnung der absoluten Häufigkeiten für die Möglichkeiten, eine Organisationsform zu realisieren, soll am Beispiel der Typen II und V gezeigt werden:
Bei Typ II bedient ein Aufzug 5 Stockwerke, ein weiterer zwei Stockwerke und drei Aufzüge je eins.
Es bestehen also zunächst $\binom{10}{5}$ Möglichkeiten, 5 Stockwerke für den betreffenden 1. Aufzug auszuwählen. Es bleiben noch 5 Etagen, aus denen 2 für den 2. Aufzug genommen werden. Dafür gibt es $\binom{5}{2}$ Möglichkeiten. Die restlichen drei Aufzüge bedienen die letzten 3 Etagen, hier ist es gleichgültig, welche Etage von welchem Aufzug angefahren wird.

Tab. 4.3 : Zahl der Möglichkeiten für die Organisationstypen der Zonensteuerung

Organisationstyp	absolute Häufigkeiten h_i
I	$\binom{10}{6} = 210$
II	$\binom{10}{5}\binom{5}{2} = 2520$
III	$\binom{10}{4}\binom{6}{3} = 4200$
IV	$\binom{10}{4}\binom{6}{4}\frac{4!}{2!\,2\,2!} = 9450$
V	$\binom{10}{2}\binom{8}{6}\frac{6!}{3!\,2\,2!} = 12600$
VI	$\binom{10}{3}\binom{7}{6}\frac{6!}{2!\,3\,3!} = 12600$
VII	$\frac{10!}{2!\,5\,5!} = 945$
Σ	42525

Bei Typ 5 ist die Lage etwas komplizierter:
Für den Aufzug, der 2 Etagen bedient, gibt es $\binom{10}{2}$ Möglichkeiten zur Auswahl. Es werden nun 6 der übriggebliebenen 8 Etagen ausgewählt , die dann auf zwei Dreiergruppen aufgeteilt werden. Zur Auswahl dieser 6 Etagen bieten sich $\binom{8}{6}$ Möglichkeiten an, diese kann man wieder auf $6!$ Arten anordnen.
Die ersten 3 Etagen einer Permutation sollen nun dem einen, die letzten drei dem anderen Aufzug zugeordnet werden. Jede der 2 Gruppen läßt sich in $3!$ Arten anordnen, die 2 Gruppen selbst lassen sich in $2!$ Arten den Aufzügen zuordnen. Also entstehen $6! / 3!^2\, 2!$ Möglichkeiten, um 6 Etagen auf

2 Aufzüge mit je 3 Bedienungsetagen aufzuteilen. Die restlichen 2 Etagen werden von den übrigen 2 Aufzügen bedient, wobei es wieder gleichgültig ist, welcher Aufzug welche Etage bedient - aber jeder eine.
Insgesamt ergeben sich - vgl. Tab. 4.3 - 42525 Möglichkeiten für eine Zonensteuerung.
Wie schon erwähnt wurde in dieser Arbeit von einer vorgegebenen Verteilung der Zonen an die Aufzüge ausgegangen, sie ist in Tab. 4.4 sowie Tab. 4.5 dargestellt.

Tab. 4.4 : Zuordnung der Zonen an die Aufzüge bei empirischer Zielverteilung

Bedienende Aufzüge	Zieletagen 2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	A								
A,B	A					B			
A,B,C	A			B			C		
A,B,C,D	A			B		C		D	
A,B,C,D,E	A		B		C		D		E
A,B,C,D,E,F	A		B		C		D	E	F

Tab. 4.5 : Zuordnung der Zonen an die Aufzüge bei einer gleichverteilten Zielverteilung

Bedienende Aufzüge	Zieletagen 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A,B,C,D,E,F	A		B		C		D		E	F

Zu Tab. 4.4:
Bei einem Aufzug ergibt sich keine Zonensteuerung, bei zwei Aufzügen werden die neun Etagen im Verhältnis 5 zu 4 von unten aufgeteilt. Bei dreien bedient jeder Aufzug drei auf-

einanderfolgende Etagen, bei vier Aufzügen werden die Stockwerke im Verhältnis 3 zu 2 zu 2 zu 2, bei fünf im Verhältnis 2 zu 2 zu 2 zu 2 zu 1 und bei sechs im Verhältnis 2 zu 2 zu 2 zu 1 zu 1 zu 1 von unten aufgeteilt.

Zu Tab. 4.5:

Die Simulationsläufe mit gleichverteilter Zielverteilung wurden nur mit einer vorgegebenen Anzahl von sechs Aufzügen durchgeführt. Wegen der Gleichverteilung wird nun auch das 1. Geschoß angefahren, die Zahl der Stockwerke erhöht sich also.

Grundgedanke der Aufteilung war, möglichst jedem Aufzug die gleiche Zahl von zu bedienenden Stockwerken zuzuordnen. Genau konnte dies nur bei drei Aufzügen erreicht werden, in den anderen Fällen wurde so vorgegangen, daß die oberen Zonen weniger Etagen umfassen.

Bei der Simulation wird die Zuordnung etwa - z.B. für sechs Aufzüge, Ziele gleichverteilt - so vorgenommen:

Für I = 1 ... 9 gilt Aufzug = $(I + 1)/2$, für I = 10 gilt Aufzug = 6 . Aufzug ist eine Integer-Variable.

Nachdem beschrieben wurde, wie die Aufteilung der Zonen vorgenommen wurde, soll nun die Simulation des Aufzugsverkehrs selbst geschildert werden.

Nach Ankunft eines Benutzers wird über die Zielverteilung - vgl. Tab. 3.10 bzw. Formel 4.2 - das Zielstockwerk I festgelegt. Die Zahl der nach I fahrenden Aufzugbenutzer wird um 1 erhöht. Der I bedienende Aufzug wird unter Zugrundelegen der Tab. 4.4 bzw. 4.5 bestimmt.

Jedem Aufzug werden bei der Abfahrt im Erdgeschoß zwei Zeiten zugeordnet,und zwar T_{zur} und T_{abf}. T_{zur} ist der gespeicherte Wert für die Rückkehr des abfahrenden Aufzuges, T_{abf} gibt den Zeitpunkt der Abfahrt an.

Ist nun der letzte für den Stockwerk I bedienenden Aufzug gespeicherte Wert T_{zur} größer als T_{ank} - der Ankunftszeit des Benutzers, dann ist der Aufzug abgefahren aber noch nicht zurück im Erdgeschoß; er befindet sich also im Gebäude. Die Warteschlange für Ziel I wird um 1 erhöht und es wird eine neue Ankunft simuliert.

Gilt allerdings $T_{zur} \leq T_{ank}$, gibt es mehrere Alternativen.

1. Niemand wartet bisher auf den Aufzug:
In diesem Fall wird die Warteschlange auf Länge 1 gesetzt und vom Ankunftssimulator ein neuer Kunde erzeugt. Für einen später ankommenden Kunden mit demselben Ziel I ergibt sich die folgende 2. Alternative, denn jetzt wartet jemand auf den Aufzug.

2. Schlangenlänge > 0 :
Es muß jetzt überprüft werden, ob der Aufzug eventuell schon wieder abgefahren ist und vielleicht auch schon wieder zurück ist usw.
Die Abfahrtszeit des Aufzuges ergibt sich aus der Summe der Einstiegszeit von L Benutzern - L ist der kleinere Wert von Schlangenlänge und Kapazität des Aufzuges - der Zeit für das Türenöffnen und Schließen sowie dem größeren Wert von Ankunftszeit des 1. wartenden Kunden bzw. Ankunftszeit des Aufzuges. Der größere Wert - die spätere Zeit - von Ankunftszeit des 1. Kunden in der Warteschlange bzw. T_{zur} ist deshalb entscheidend, da entweder der Aufzug auf eintreffende Benutzer oder der 1. Benutzer auf den Aufzug warten muß.
Liegt die voraussichtliche Abfahrtszeit später als T_{ank}, ist der Aufzug noch nicht abgefahren. Die Schlangenlänge wird um 1 erhöht und ein neuer Kunde erzeugt. Der Wert für T_{abf} wird wieder gelöscht, da noch nicht abzusehen ist, wann der Aufzug wegen eventueller neuer Ankünfte tatsächlich abfährt.
Für einen nachfolgenden Benutzer, der mit demselben Aufzug fahren will, ergibt sich nun entweder genau dieselbe Situation, nämlich daß die anderen Benutzer noch im Einsteigen

begriffen sind, oder aber daß der Aufzug schon wieder abgefahren ist.
In diesem Falle, also nach Abfahrt eines Aufzuges, werden die ersten L Personen aus der Warteschlange gestrichen. Die jeweilige Wartezeit wird als Differenz aus der Abfahrtszeit des Aufzuges und der Ankunftszeit des betreffenden Benutzers ermittelt. Bei dieser Definition wird die Zeit, die der Benutzer vor der Kabine wartet, weil andere Mitfahrer einsteigen, ebensowie die Zeit, die er in der Kabine wartet, weil andere noch nicht eingestiegen sind, als Wartezeit gewertet. Man hätte natürlich auch die Wartezeit in der haltenden Kabine als Reisezeit definieren können, dann würde die Wartezeit als Zeit zwischen Eintreffen des Benutzers und Betreten der Kabine zu messen sein.

Die Berechnung der Reisezeit erfolgt bei jedem Halt des Aufzuges. Sie ist definiert als Zeit, die von Abfahrt des Lifts im Erdgeschoß bis zum Verlassen des betreffenden Benutzers in der Zieletage verstreicht. Die Reisezeit setzt sich zusammen aus der reinen Fahrzeit des Aufzuges, aus den Zeiten für Zwischenstops und aus der Zeit, die von Eintreffen des Aufzuges an der Zieletage an vergeht, bis der Benutzer die Kabine verlassen hat. Die Berechnung erfolgt folgendermaßen: Im Programm wird der Stockwerkszähler bei Durchfahrt durch die Etagen um je eine Einheit erhöht, bis ein Fahrgast aussteigen möchte. Es wird die Zeit berechnet, die der Aufzug von der Abfahrt bei der letzten Haltestelle bis zur Abfahrt in diesem Geschoß benötigt. Diese Zeit setzt sich zusammen aus der Fahrzeit für eine n-Stockwerke-Fahrt, der Ausstiegszeit für die Aussteiger im betreffenden Geschoß und der Türöffnungs- und Türschließzeit. Die reine Fahrzeit wird nach der Fahrzeitformel - 2.1- bestimmt, den Ausstiegszeiten liegen die empirischen Messungen zugrunde - 2.3 - . $\sum_{i=1}^{n} z_i$ - n Halte - gibt die Zeit an, die seit Abfahrt im Erdgeschoß vergeht, bis der letzte Fahrgast den Lift ver-

lassen hat und die Türen geschlossen sind. Für die Reisezeit des j-ten Aussteigers in Stockwerk k ergibt sich demnach :

$$rz_{kj} = \sum_{i=1}^{l} z_i - t_{aus}(m) + t_{aus}(j) - tz \qquad l \leq k$$

m = Zahl der Aussteiger in k
tz = Türschließzeit
$t_{aus}(i)$ siehe Formel -2.3-

Um die Umlaufzeit des Aufzuges zu berechnen, muß zu $\sum_{i=1}^{n} z_i$ noch die Zeit addiert werden für die Fahrt von der letzten Haltestelle zurück nach E:

$$ulz = \sum_{i=1}^{n} z_i + t_n \qquad \text{- siehe für } t_n \text{ Formel 2.1 -}$$

Als Zeitpunkt, an dem der Aufzug wieder an der Haupthaltestelle eintrifft, ergibt sich also:

$$T_{zur} = T_{abf} + ulz \quad .$$

Zusammenfassend läßt sich folgendes sagen:
Nach Abfahrt des Aufzuges im Erdgeschoß wird die Länge der Warteschlange um die Zahl der Eingestiegenen vermindert bzw. sie ist jetzt 0 . Die Warte- und Reisezeiten sowie der Rückkehrzeitpunkt des Aufzuges werden bestimmt.
Hat der Aufzug vor Eintreffen des betreffenden Benutzers alle Wartenden mitnehmen können, so wird die Länge der Warteschlange 1 gesetzt und eine neue Ankunft vom Ankunftssimulator erzeugt.
Sind wartende Personen übriggeblieben, rückt die gesamte Warteschlange entsprechend auf. Die gesamten Schleifen werden nochmals durchlaufen, falls der Aufzug schon vor der Ankunft des betreffenden Benutzers wieder zurück sein sollte; dies ist natürlich sehr unwahrscheinlich. Falls der Aufzug noch nicht wieder da ist, erhöht sich die Warteschlange um 1 und eine neue Ankunft wird erzeugt.

4.2.2 Die Simulation der Normalsteuerung

Das Simulationsprogramm der Normalsteuerung unterscheidet sich von dem der Zonensteuerung bei der Zuweisung der Aufzüge an die einzelnen Benutzer.
Bei der Zonensteuerung liegt, wie im vorigen Abschnitt geschildert, nach der Zielsimulation der zu bedienende Aufzug nach Tab. 4.4 bzw. 4.5 fest. Bei der Normalsteuerung kann jedoch jeder Aufzug jede Etage bedienen.
Es ist eine Zuordnungsregel aufzustellen. Es ist rational, daß der Benutzer, wenn er bei seinem Eintreffen keinen Aufzug frei vorfindet, den ersten danach im Erdgeschoß ankommenden Aufzug betritt- falls allerdings nicht mehr Personen warten als der Aufzug fasst. Bedient wird wie bei der Zonensteuerung nach dem Fifo-Prinzip. Sind bei Ankunft des Benutzers mehrere Aufzüge frei, so könnte der Benutzer jeden Aufzug betreten. Im folgenden wird die Aufzugsanlage so gesteuert, daß immer nur ein Aufzug im Erdgeschoß die Türen offenhält. Wenn dieser seine Türen schließt- entweder weil er gefüllt ist oder weil während der letzten zwei Sekunden niemand mehr kam, öffnet der nächste Aufzug seine Türen.Diese Regelung erscheint sinnvoller als eine, bei der alle Aufzüge betreten werden können, da die Aufzüge sonst wahrscheinlich mit zu geringer Belastung fahren. In dem beobachteten Gebäude wurde die Aufzugssteuerung nach der zweiten Art angelegt. Um sie zu umgehen, wird jeden Morgen ein Beschäftigter benötigt, der die ankommenden Personen davon abhält, einen beliebigen freien Aufzug zu betreten. Er schleust alle Ankommenden in einen Aufzug, der dann abfährt, wenn er gefüllt ist oder wenn der Einweiser es wünscht.

In unserem Simulationsprogramm wird nach Ankunft eines Benutzers der ihn bedienende Aufzug festgelegt.

Wie vorher geschildert, wird bei Abfahrt eines Aufzuges dessen Rückkehrzeitpunkt T_{zur} bestimmt. Diese Rückkehrzeiten werden laufend während des Programmablaufes neu sortiert und der Größe nach geordnet. Dem Benutzer wird nun der Aufzug mit der niedrigsten Rückkehrzeit zugeordnet.
Im übrigen ist der Programmablauf dem bei der Zonensteuerung weitgehend ähnlich. Bei beiden Steuerungsarten werden die Warteschlangen pro Stockwerk gemessen. In dem Warteraum gibt es jetzt natürlich nur eine Warteschlange, die sich auf den als ersten kommenden Aufzug konzentriert, während es bei der Zonensteuerung soviele Warteschlangen wie Aufzüge bzw. Zonen gibt.

4.3 Die Ergebniseinheit

Pro Simulationslauf - die Simulation eines Aufzugssystems mit einer bestimmten Steuerung, mit einer vorgegebenen Zahl von Aufzügen und vorgegebener Ankunfts- und Zielverteilung der Benutzer - werden 9000 Kunden durch das System geschleust.
Einige Vortests unter unterschiedlicher Belastung der Aufzugsanlage ergaben, daß nach ca. 400 Ankünften eine Stabilisierung des Systems erreicht war. Deshalb werden nach Durchlauf von 1000 Personen alle Statistiken gelöscht und nur die Werte der folgenden 8000 berücksichtigt.
Diese 8000 werden in 20 Blöcke zu 400 unterteilt. Für jeden Block werden pro Zieletage die Mittelwerte und Varianzen der Warte- und Reisezeiten berechnet, weiterhin die Zahl der Ankünfte und Bedienungen und die kumulierten Werte für die durchschnittlichen Warte-, Reise- und Verweilzeiten - Summe aus Reise- und Wartezeit - pro Stockwerk. Siehe Tab.4.6 als ein Beispiel für einen Teil des Computer-Outputs.

Tab. 4.6: Blockoutput bei Zonensteuerung mit 5 Fahrstühlen für Modell 3 , Typ I

6800 ANKUENFTE

STOCKWERK	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ANK. PRO STOCKWERK	21	51	67	57	30	56	43	48	27
BEDIENUNGEN PRO ST.	20	52	69	58	29	56	45	48	27
DURSCHN. W.ZEIT	16.651	13.921	30.277	28.809	25.396	28.091	36.481	37.607	15.268
VARIANZ W.ZEIT	178.43	116.89	228.63	245.00	341.55	255.24	338.45	337.10	292.89
DURSCHN. R.ZEIT	13.099	17.908	17.396	28.522	20.409	28.529	24.187	38.039	27.337
VARIANZ R.ZEIT	0.16	25.20	1.24	29.92	0.28	37.04	0.56	5.61	0.04
KUM. D. WARTEZEIT	16.245	16.297	27.686	26.950	31.044	30.612	35.769	36.613	22.285
KUM. D. REISEZEIT	13.120	19.069	17.439	28.909	20.792	31.425	24.531	36.652	27.691
KUM. D. VERW.ZEIT	29.364	35.366	45.124	55.859	51.836	62.036	60.300	73.265	49.976

Pro Block werden für alle Etagen zusammengenommen die durchschnittliche Warte-, Reise- und Verweilzeit sowie die Varianzen von Warte- und Reisezeit berechnet.

Alle diese Werte sind als Stichprobenwerte aus einer unendlich großen Grundgesamtheit aufzufassen. Aus den berechneten Stichprobenparametern könnte man nun Punktschätzwerte und Konfidenzintervalle für die entsprechenden Parameter der Grundgesamtheit bestimmen.
Die üblichen Formeln für Konfidenzintervalle, in denen die Varianz der Stichprobe als Schätzwert für die Varianz der Grundgesamtheit eingeht, gelten nun nur für Stichproben, bei denen keine Autokorrelation herrscht. Bei einer Warteschlange sind jedoch die Wartezeiten der ankommenden Personen von der Länge der Warteschlange abhängig, in die sie sich einreihen, sowie von der Dauer der Bedienungen der Vorgänger.
Bei unserer Definition der Wartezeit gehört zur Wartezeit sowohl die Zeit, die von der Ankunft der betreffenden Person bis zum Betreten der Kabine verstreicht, als auch die Zeit, die zum Einstieg aller mitfahrenden Personen in den Aufzug noch benötigt wird.
Die Wartezeiten der Einsteiger sind also alle durch eine additive Komponente miteinander verknüpft, nämlich durch die Einstiegszeit aller Einsteiger, die wiederum abhängt von der Schlangenlänge bzw. von der Kapazität des Aufzuges - falls mehr Personen warten als der Aufzug aufnehmen kann. Die Wartezeit der in diesem Falle nicht Beförderten ist noch höher korreliert, weil sie ja jetzt alle zusammen auf die Ankunft des nächsten Aufzuges warten müssen.

Bei den Reisezeiten ergibt sich eine Autokorrelation ebenfalls dadurch, daß ein Aufzug im Normalfall nicht nur eine Person befördert.
Ein Benutzer, der in ein höheres Stockwerk fahren möchte, hat je nachdem,ob er wenig oder viel Mitfahrer hat - was wiederum von der Länge der Warteschlange beeinflußt wird,

mehr oder weniger Zwischenaufenthalte zu erwarten.
Auch seine Ausstiegszeit hängt von der Zahl der Mitaussteiger ab, die auch von der Schlangenlänge beeinflußt wird.
Die Reisezeiten der Benutzer eines Aufzuges sind also mittelbar über die Schlangenlänge bei Eintritt in das System miteinander verknüpft. Diese Autokorrelation macht sich mit steigendem Zieletagenindex stärker bemerkbar, da die Zahl der Zwischenaufenthalte tendenziell zunimmt.

Die einfachste Methode, die Autokorrelation auszuschalten, besteht darin, daß man die Stichprobe vom Umfang n in k unabhängige Blöcke unterteilt[1]. Die k Blockparameter - z.B. Mittelwerte - bilden die Grundlage für die Schätzung der Parameter der Grundgesamtheit. Die Blocklänge ist so zu wählen, daß die Blockmittelwerte unabhängig voneinander sind.
In einem Vortest wurden 20 Blockmittelwerte der Warte- und Reisezeiten bei der gewählten Blocklänge 400 mithilfe des v. Neumann-Tests auf Autokorrelation untersucht[2], vgl. Tab. 4.7. Dieser Test wurde wegen des relativ kleinen Stichprobenumfangs von k=20 gewählt. Autokorrelation konnte bei beiden Reihen mit sehr hoher Sicherheit abgelehnt werden.

Daß nun gerade k = 20 gewählt wurde, ist statistisch nicht genau begründbar. Die Bestimmung der erforderlichen Anzahl von Blöcken ist dasselbe Problem wie das der Bestimmung des notwendigen Stichprobenumfangs.

---

[1] Vgl. hierzu: James R. Emshoff u. Roger L. Sisson, Design and use of computer simulation models, New York 1970, S.200ff

[2] Vgl.: J. von Neumann, Distribution of the ratio of the mean square successive difference to the variance. In: Annals of mathematical statistics, 12. Jg. 1941, S.367 ff.
Derselbe, A further remark on the distribution of the ratio of mean successive differences to the variance. In: Ann. math. stat., 13. Jg. 1942, S. 86 ff.

Tab. 4.7 : Vortest auf Autokorrelation von 20 Blockmittelwerten bei einer Blocklänge von 400

Block	durchschn. Wartezeit in sec	durchschn. Reisezeit in sec	
1	16,2	31,2	
2	17,3	36,3	
3	17,0	33,4	
4	18,1	35,1	
5	21,1	40,0	Mit 95% Sicherheits-
6	17,6	32,4	wahrscheinlichkeit
7	20,6	35,9	kann auf positive -
8	17,4	34,8	bzw. negative - Auto-
9	16,8	33,3	korrelation geschlos-
10	19,0	32,7	sen werden, wenn der
11	16,4	32,7	Wert der v. Neumann
12	17,7	33,4	ratio kleiner ist als
13	15,6	33,4	1,368 - bzw. größer
14	16,9	33,2	ist als 2,8425 [1].
15	15,2	33,6	
16	18,9	34,3	
17	16,7	33,9	
18	20,4	35,0	
19	15,8	34,1	
20	18,2	33,1	
v. Neum. ratio	2,5187	2,2717	

[1] Vgl.: B.I.Hart, Significance levels for the ratio of the mean square successive difference to the variance. In: Ann. math. stat., 13. Jg. 1942, S. 445 ff .

Es ist eine bestimmte Fehlerbreite vorzugeben, damit der notwendige Stichprobenumfang bestimmt werden kann. Um die Fehlerbreite zu minimieren, muß der Stichprobenumfang maximiert werden - dies führt zur Vollerhebung. Nun ist eine Vollerhebung entweder gar nicht möglich oder aus Kostengründen nicht zu vertreten.
Bei der Simulation spielt die Kostenfrage eine erhebliche Rolle, da eine größere Anzahl Teilsimulationsläufe mehr Rechenzeit verursacht als eine kleinere Zahl.
Eine Vollerhebung ist bei unserem Problem nicht möglich, sonst brauchte gar nicht simuliert zu werden.
Für die Bestimmung des notwendigen Stichprobenumfanges ist weiterhin die Kenntnis der Varianz der Grundgesamtheit erforderlich. Die Warte- und Reisezeiten sollen aber gerade durch die Simulation ermittelt werden und auch eine Vorstichprobe als Anhaltspunkt für die Schätzung der Grundgesamtheitsparameter ist nicht sinnvoll, da diese Vorstichprobe - ein kürzerer Simulationslauf, der aber auch mindestens den Stabilisierungsbereich erreicht haben muß - für jeden Simulationslauf vorzunehmen wäre.
k = 20 wurde deswegen gewählt, da k einerseits nicht zu klein für die Konfidenzintervalle ist - wie sich nach einigen Simulationsläufen zeigte- und andererseits nicht zu hohe Rechenzeiten verursacht . Einer dieser Läufe verursacht im Durchschnitt etwas über zwei Minuten Kernspeicherrechenzeit.
Zur Bestimmung eines Konfidenzintervalles für einen Grundgesamtheitsparameter wird die Varianz der k Blockmittelwerte berechnet und als Schätzwert für die Varianz der Grundgesamtheit verwendet.[1] Deshalb ist für die Schätzung die Student-Verteilung zu verwenden.

[1] Vgl.: Emshoff, Sisson, a.a.O.

5 Die Ergebnisse der Simulation und ihre Analyse

5.1 Die Darstellung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationsläufe des Typs I - empirische Ankunfts- und Zielverteilungen - werden dargestellt in den Tabellen 5.1 bis 5.24.
Pro Modell handelt es sich um sechs Tabellen, je drei pro Steuerungsart - Tabellen der durchschnittlichen Warte- , Reise- bzw. Verweilzeiten.
Die Tabellen sind spaltenweise nach Zahl der eingesetzten Aufzüge, zeilenweise zunächst nach den Zieletagen gegliedert. In den letzten drei Zeilen sind die Durchschnittswerte gemittelt über alle Etagen - Total , sowie die Unter- und Obergrenzen der 95%-Konfidenzintervalle - K.I. U.G. bzw. K.I. O.G. - angegeben.

In den Tabellen 5.25 und 5.26 werden für Normal- und Zonensteuerung die Ergebnisse für Typ II - den Ankünften liegt eine Poissonverteilung mit dem gleichen Mittelwert zugrunde, den auch die empirische Ankunftsverteilung II besitzt, während die Zielverteilung empirisch ist - dargestellt. Die Aufzugsgruppe besteht aus drei Aufzügen.

In den Tabellen 5.27 bis 5.29 sind die Ergebnisse der Modelle vom Typ III dargestellt, die Tabellen 5.30 bis 5.32 zeigen die Ergebnisse des Typs IV.
Spaltenweise sind diese Tabellen nach den Mittelwerten und Varianzen der Warte- bzw. Reise- oder Verweilzeiten geordnet, dabei sind jeweils die Werte für Normal- und Zonensteuerung gegenübergestellt. Zeilenweise ergibt sich die Gliederung einer Tabelle nach den alternativen Mittelwerten der als Ankunftsverteilungen dienenden Poissonverteilungen.

Die Abbildungen sind folgendermaßen gegliedert:
Für zwei Modelle des Typs I wird die Darstellung der Ergebnisse durch graphische Darstellungen ergänzt, und zwar für das mit der schwächsten - Ankunftsverteilung I - und das mit der stärksten Ankunftsintensität - Ankunftsverteilung II.
Die Abbildungen 5.1 bis 5.6 zeigen die Ergebnisse aus Tab. 5.1 bis 5.6 für die einzelnen Zieletagen.
Die Abbildungen 5.7 und 5.8 stellen die über alle Etagen gemittelten Durchschnittswerte von Warte-, Reise- und Verweilzeit für zwei bis sechs Aufzüge bei Normalsteuerung - Abb. 5.7 - bzw. Zonensteuerung - Abb. 5.8 - dar.
In den drei folgenden Abbildungen werden die totalen durchschnittlichen Warte-, Reise- bzw. Verweilzeiten für beide Steuerungsarten bei zwei bis sechs Aufzügen einander gegenübergestellt.
Abb. 5.12 bis 5.22 sind analog für das Modell 2 - Ankunftsverteilung II - gegliedert.
In den Abb. 5.23 bis 5.28 werden die totalen durchschnittlichen Warte- bzw. Reise- oder Verweilzeiten bei Zonen- und Normalsteuerung einander bei alternativen Ankunftsintensitäten gegenübergestellt, und zwar für Typ III - Abb. 5.23 bis 5.25 - und für Typ IV - Abb. 5.26 bis 5.28.

Tab. 5.1 : Wartezeitverteilung bei Normalsteuerung, Typ I , Ankunftsverteilung I , in sec

Ziel-etage \ Anzahl Auf-züge	2	3	4	5	6
2	47,90	23,82	14,55	8,76	6,58
3	47,22	22,53	14,12	8,98	6,69
4	47,78	22,30	13,62	8,90	6,35
5	46,32	23,01	14,18	9,61	6,50
6	46,86	22,27	13,37	8,71	6,43
7	47,23	22,90	12,94	8,58	6,48
8	45,67	22,99	14,46	9,24	6,34
9	45,78	23,14	13,86	9,04	6,60
10	45,10	22,69	13,47	9,13	6,44
Total	46,71	22,81	13,80	8,99	6,48
K.I. U.G.	43,97	22,07	13,29	8,56	6,24
K.I. O.G.	49,46	23,55	14,31	9,41	6,73

Tab. 5.2 : Wartezeitverteilung bei Zonensteuerung, Typ I , Ankunftsverteilung I , in sec

Ziel-etage \ Anzahl Auf-züge	2	3	4	5	6
2	47,98	24,63		14,14	←
3	48,53	25,09	←	13,43	—
4	46,38	24,58	—	22,02	←
5	48,61	35,50	23,11	22,79	—
6	50,09	34,40	22,47	25,93	←
7	48,63	34,36	28,40	25,87	—
8	48,85	38,26	27,58	30,82	17,53
9	48,65	38,94	31,27	29,70	22,04
10	49,15	38,30	31,92	18,64	←
Total	48,43	32,51	26,44	23,16	20,82
K.I. U.G.	47,43	32,10	25,99	22,77	20,42
K.I. O.G.	49,43	32,92	26,88	23,56	21,22

Tab. 5.3 : Reisezeitverteilung bei Normalsteuerung , Typ I , Ankunftsverteilung I , in sec

Ziel-etage \ Anzahl Auf-züge	2	3	4	5	6
2	13,33	13,17	13,05	13,00	12,98
3	22,00	19,33	18,16	17,11	16,52
4	32,35	27,26	23,77	21,68	20,53
5	43,76	36,31	31,14	27,93	25,93
6	54,75	44,64	36,72	32,95	30,08
7	64,72	51,78	42,52	36,99	34,15
8	74,67	60,39	49,95	42,28	37,96
9	85,45	68,00	55,90	48,09	43,43
10	95,62	75,31	60,73	52,59	47,32
Total	53,67	43,69	36,62	32,28	29,69
K.I. U.G.	52,74	42,74	35,96	31,62	29,19
K.I. O.G.	54,60	44,64	37,28	32,94	30,19

Tab. 5.4 : Reisezeitverteilung bei Zonensteuerung , Typ I , Ankunftsverteilung I , in sec

Ziel-etage \ Anzahl Auf-züge	2	3	4	5	6
2	13,48	13,19	←	13,06	←
3	23,41	20,46	←	17,98	———
4	34,73	28,26	———	17,07	←
5	47,64	18,89	18,74	26,50	———
6	60,18	29,37	27,10	20,54	←
7	22,88	38,98	22,48	28,79	———
8	34,63	24,32	31,63	24,18	24,02
9	46,63	34,70	26,09	33,40	25,92
10	58,09	46,01	35,79	27,52	←
Total	37,90	28,47	24,97	23,44	22,50
K.I. U.G.	37,35	28,24	24,80	23,28	22,36
K.I. O.G.	38,46	28,70	25,14	23,60	22,63

Tab. 5.5 : Verweilzeitverteilung bei Normalsteuerung, Typ I , Ankunftsverteilung I , in sec

Ziel-etage \ Anzahl Auf-züge	2	3	4	5	6
2	61,24	36,99	27,59	21,76	19,57
3	69,22	41,86	32,28	26,09	23,20
4	80,13	49,56	37,39	30,58	26,88
5	90,08	59,41	45,32	37,53	32,43
6	101,61	66,92	50,08	41,66	36,51
7	111,94	74,68	55,46	45,56	40,63
8	120,33	83,37	64,41	51,53	44,30
9	131,23	91,14	69,74	57,13	50,04
10	140,72	98,00	74,20	61,72	53,76
Total	100,38	66,50	50,42	41,27	36,17
K.I. U.G.	96,96	64,93	49,31	40,21	35,45
K.I. O.G.	103,81	68,07	51,53	42,32	36,89

Tab. 5.6 : Verweilzeitverteilung bei Zonensteuerung , Typ I , Ankunftsverteilung I , in sec

Ziel-etage \ Anzahl Auf-züge	2	3	4	5	6
2	61,47	37,82		27,20	←
3	71,94	45,54	←	31,41	—
4	81,11	52,84	—	39,09	←
5	96,25	54,39	41,85	49,29	—
6	110,27	63,77	49,58	46,47	←
7	71,51	73,34	50,88	54,66	—
8	83,48	62,57	59,21	55,00	41,54
9	95,29	73,63	57,36	63,09	47,96
10	107,24	84,31	67,71	46,16	←
Total	86,33	60,98	51,41	46,60	43,32
K.I. U.G.	84,96	60,40	50,90	46,11	42,84
K.I. O.G.	87,70	61,56	51,91	47,10	43,80

Tab. 5.7 : Wartezeitverteilung bei Normalsteuerung , Typ I , Ankunftsverteilung II , in sec

Anzahl Auf- züge / Ziel- etage	2	3	4	5	6
2	.	40,65	22,18	16,39	10,84
3	.	39,94	22,81	14,90	10,17
4	.	38,28	22,62	15,01	10,96
5	.	39,87	23,56	15,01	11,42
6	.	37,96	22,79	14,63	10,51
7	.	37,75	22,24	15,69	10,68
8	.	38,34	23,18	15,83	10,75
9	.	38,64	22,92	15,11	11,36
10	.	38,32	23,9	15,10	11,01
Total	.	38,76	22,88	15,25	10,87
K.I. U.G.	.	36,55	21,74	14,67	10,50
K.I. O.G.	.	40,97	24,02	15,83	11,24

Tab. 5.8 : Wartezeitverteilung bei Zonensteuerung , Typ I , Ankunftsverteilung II , in sec

Anzahl Auf- züge / Ziel- etage	2	3	4	5	6
2	216,65	31,60		18,36	←
3	221,25	32,21	←	18,11	—
4	216,27	31,91	—	28,54	←
5	217,09	41,47	28,63	28,72	—
6	214,32	40,74	28,67	31,62	←
7	69,22	42,97	34,38	31,88	—
8	69,12	46,45	34,38	35,78	22,66
9	69,91	47,62	37,58	36,45	26,63
10	67,29	47,03	36,55	22,98	←
Total	151,77	40,13	32,85	28,85	26,23
K.I. U.G.	125,60	39,18	32,22	28,37	25,73
K.I. O.G.	177,93	41,08	33,47	29,34	26,73

Tab. 5.9 : Reisezeitverteilung bei Normalsteuerung , Typ I , Ankunftsverteilung II , in sec

Ziel-etage \ Anzahl Auf-züge	2	3	4	5	6
2	.	13,35	13,22	13,15	13,06
3	.	22,33	20,59	19,21	18,01
4	.	32,44	29,06	26,06	23,91
5	.	44,41	38,70	34,61	31,49
6	.	55,21	48,20	42,90	37,90
7	.	66,01	56,37	50,26	44,02
8	.	76,28	65,83	57,56	49,32
9	.	87,47	75,34	65,89	58,35
10	.	97,74	83,64	73,28	64,41
Total	.	54,88	47,75	42,41	37,71
K.I. U.G.	.	53,99	46,75	41,59	37,18
K.I. O.G.	.	55,77	48,75	43,23	38,24

Tab. 5.10: Reisezeitverteilung bei Zonensteuerung , Typ I , Ankunftsverteilung II , in sec

Ziel-etage \ Anzahl Auf-züge	2	3	4	5	6
2	13,84	13,45		13,20	←
3	26,80	23,09	←	20,06	
4	41,72	34,53		17,59	←
5	57,57	19,39	19,07	29,48	
6	72,71	32,76	30,39	20,85	←
7	23,70	45,83	22,97	32,63	
8	38,51	24,84	35,54	24,59	24,27
9	53,45	38,54	26,60	37,24	26,29
10	67,79	51,67	39,03	27,73	←
Total	44,11	32,14	27,48	25,27	23,86
K.I. U.G.	43,61	31,81	27,25	25,12	23,72
K.I. O.G.	44,61	32,47	27,72	25,43	23,99

Tab. 5.11: Verweilzeitverteilung bei Normalsteuerung , Typ I , Ankunftsverteilung II , in sec

Ziel-etage \ Anzahl Auf-züge	2	3	4	5	6
2	.	54,00	35,40	29,55	23,90
3	.	62,27	43,40	34,11	28,18
4	.	70,72	51.67	41,07	34,87
5	.	84,28	62,25	49,62	42,91
6	.	93,17	70,99	57,53	48,41
7	.	103,76	78,61	65,95	54,70
8	.	114,62	89,02	73,39	60,07
9	.	126,10	98,26	81,00	69,71
10	.	136,06	107,54	88,38	75,42
Total	.	93,64	70,63	57,67	48,58
K.I. U.G.	.	90,89	68,59	56,36	47,75
K.I. O.G.	.	96,39	72,67	58,97	49,41

Tab. 5.12: Verweilzeitverteilung bei Zonensteuerung , Typ I , Ankunftsverteilung II , in sec

Ziel-etage \ Anzahl Auf-züge	2	3	4	5	6
2	230,49	45,05		31,55	←
3	248,05	55,30	←	38,17	
4	257,99	66,44		46,12	←
5	274,67	60,85	47,70	58,20	
6	287,03	73,51	59,07	52,47	←
7	92,92	88,80	57,35	64,51	
8	107,63	71,29	69,92	60,36	46,93
9	123,36	86,17	64,18	73,69	52,93
10	135,07	98,70	75,58	50,70	←
Total	195,88	72,27	60,33	54,13	50,08
K.I. U.G.	169,81	71,15	59,57	53,57	49,51
K.I. O.G.	221,94	73,40	61,10	54,69	50,66

Tab. 5.13: Wartezeitverteilung bei Normalsteuerung , Typ I , Ankunftsverteilung III , in sec

Ziel-etage \ Anzahl Auf-züge	2	3	4	5	6
2	.	33,36	19,69	13,82	9,41
3	.	33,90	20,13	13,10	9,36
4	.	32,65	20,20	13,38	9,15
5	.	33,06	20,68	13,54	9,45
6	.	33,16	19,39	13,59	9,38
7	.	33,05	19,68	13,09	9,41
8	.	31,87	20,99	13,38	9,69
9	.	33,46	20,86	13,81	9,20
10	.	32,14	20,39	13,51	9,77
Total	.	32,96	20,24	13,45	9,40
K.I. U.G.	.	30,99	19,35	12,80	9,01
K.I. O.G.	.	34,93	21,14	14,09	9,78

Tab. 5.14: Wartezeitverteilung bei Zonensteuerung , Typ I , Ankunftsverteilung III , in sec

Ziel-etage \ Anzahl Auf-züge	2	3	4	5	6
2	74,37	30,28		16,40	←
3	71,99	29,45	←	16,48	
4	70,73	30,06		27,50	←
5	69,75	40,55	27,59	26,89	
6	71,10	40,99	27,50	30,77	←
7	63,42	39,56	33,90	30,53	
8	58,51	46,45	32,75	35,97	22,28
9	64,32	46,37	36,61	36,42	26,53
10	63,05	45,69	35,73	22,28	←
Total	67,25	38,85	31,57	28,04	25,23
K.I. U.G.	62,95	38,04	31,07	27,58	24,83
K.I. O.G.	71,55	39,65	32,06	28,50	25,63

Tab. 5.15: Reisezeitverteilung bei Normalsteuerung , Typ I , Ankunftsverteilung III , in sec

Ziel-etage \ Anzahl Auf-züge	2	3	4	5	6
2	.	13,28	13,16	13,10	13,03
3	.	21,07	19,69	18,40	17,40
4	.	30,62	27,49	24,58	22,85
5	.	42,08	36,69	32,22	29,67
6	.	52,18	44,17	38,95	34,86
7	.	61.67	51,92	44,94	40,27
8	.	72,58	62,37	52,58	47,19
9	.	81,64	70,54	59,36	52,01
10	.	92,45	77,33	66,45	58,42
Total	.	52,39	45,21	39,23	35,31
K.I. U.G.	.	51,35	44,22	38,33	34,61
K.I. O.G.	.	53,43	46,20	40,14	36,02

Tab. 5.16: Reisezeitverteilung bei Zonensteuerung , Typ I , Ankunftsverteilung III , in sec

Ziel-etage \ Anzahl Auf-züge	2	3	4	5	6
2	13,73	13,33		13,15	←
3	25,62	21,88	←	19,33	
4	39,40	32,32		17,42	←
5	54,22	19,29	18,98	28,78	
6	68,54	31,65	29,50	20,81	←
7	23,53	43,97	22,89	31,69	
8	38,37	24,79	35,18	24,55	24,24
9	52,35	37,97	26,44	36,63	26,18
10	66,78	51,45	38,57	27,67	←
Total	42,62	31,33	26,86	25,03	23,63
K.I. U.G.	42,15	30,92	26,61	24,79	23,46
K.I. O.G.	43,08	31,74	27,11	25,27	23,81

Tab. 5.17: Verweilzeitverteilung bei Normalsteuerung , Typ I , Ankunftsverteilung III , in sec

Ziel-etage \ Anzahl Auf-züge	2	3	4	5	6
2	.	46,63	32,85	26,91	22,44
3	.	54,96	39,83	31,50	26,76
4	.	63,27	47,69	37,95	32,00
5	.	75,14	57,36	45,76	39,12
6	.	85,34	63,56	52,54	44,23
7	.	94,71	71,60	58,03	49,68
8	.	104,45	83,36	65,95	56,88
9	.	115,09	91,40	73,16	61,20
10	.	124,59	97,72	79,96	68,19
Total	.	85,35	65,45	52,68	44,71
K.I. U.G.	.	82,51	63,67	51,18	43,66
K.I. O.G.	.	88,18	67,23	54,17	45,76

Tab. 5.18: Verweilzeitverteilung bei Zonensteuerung , Typ I , Ankunftsverteilung III , in sec

Ziel-etage \ Anzahl Auf-züge	2	3	4	5	6
2	88,10	43,61		29,55	←
3	97,60	51,34	←	35,81	—
4	110,12	62,38	—	44,92	←
5	123,97	59,85	46,57	55,67	—
6	139,64	72,64	57,00	51,58	←
7	86,95	83,53	56,79	62,22	—
8	96,88	71,24	67,93	60,52	46,53
9	116,67	84,34	63,05	73,05	52,71
10	129,82	97,14	74,29	49,96	←
Total	109,86	70,18	58,43	53,07	48,86
K.I. U.G.	105,39	69,15	57,82	52,43	48,34
K.I. O.G.	114,34	71,20	59,04	53,71	49,38

Tab. 5.19: Wartezeitverteilung bei Normalsteuerung , Typ I , Ankunftsverteilung IV , in sec

Ziel-etage \ Anzahl Auf-züge	2	3	4	5	6
2	73,78	27,08	17,20	10,80	7,96
3	76,50	27,95	17,50	11,45	7,90
4	75,68	27,24	17,57	11,05	7,97
5	74,36	27,51	16,36	11,00	7,65
6	73,40	26,77	17,42	11,15	7,73
7	72,72	26,56	16,42	11,21	7,73
8	75,55	26,61	17,79	11,05	8,02
9	75,60	26,61	17,09	11,40	7,83
10	74,63	27,27	17,48	11,50	8,03
Total	74,72	27,05	17,18	11,17	7,86
K.I. U.G.	64,64	25,90	16,23	10,53	7,49
K.I. O.G.	84,81	28,21	18,12	11,82	8,22

Tab. 5.20: Wartezeitverteilung bei Zonensteuerung , Typ I , Ankunftsverteilung IV , in sec

Ziel-etage \ Anzahl Auf-züge	2	3	4	5	6
2	56,60	27,92		14,64	
3	56,12	27,09	←	15,21	←
4	56,87	27,15		25,59	
5	56,57	36,97	25,43	24,42	←
6	55,38	36,36	24,96	27,38	
7	53,16	37,65	30,82	28,48	←
8	53,62	41,83	31,06	33,48	20,06
9	54,13	42,71	32,12	32,38	23,69
10	54,49	43,66	33,26	21,48	←
Total	55,22	35,49	28,74	25,48	22,99
K.I. U.G.	53,48	34,63	28,19	25,01	22,51
K.I. O.G.	56,96	36,34	29,30	25,95	23,46

Tab. 5.21: Reisezeitverteilung bei Normalsteuerung , Typ I , Ankunftsverteilung IV , in sec

Ziel-etage \ Anzahl Auf-züge	2	3	4	5	6
2	13,40	13,27	13,16	13,09	13,04
3	23,24	20,24	18,67	17,68	16,98
4	34,47	29,10	25,63	22,62	21,41
5	46,64	39,60	34,39	30,30	27,76
6	59,14	48,49	42,34	36,71	32,90
7	70,11	56,04	46,54	41,26	36,62
8	81,91	65,79	56,00	47,93	43,00
9	94,21	75,05	61,72	53,80	47,98
10	105,14	83,69	70,99	58,84	52,63
Total	58,28	47,57	40,67	35,55	32,25
K.I. U.G.	57,55	46,53	39,68	34,67	31,59
K.I. O.G.	59,02	48,60	41,66	36,43	32,91

Tab. 5.22: Reisezeitverteilung bei Zonensteuerung , Typ I , Ankunftsverteilung IV , in sec

Ziel-etage \ Anzahl Auf-züge	2	3	4	5	6
2	13,56	13,31		13,18	←
3	24,84	20,96	←	18,72	
4	37,79	30,36		17,22	←
5	51,98	19,07	18,82	27,72	
6	65,26	30,94	28,30	20,63	←
7	23,15	41,33	22,64	29,99	
8	36,48	24,53	33,01	24,37	24,11
9	49,14	36,12	26,25	34,74	26,00
10	62,87	48,37	37,06	27,61	←
Total	40,39	29,71	25,75	24,11	23,02
K.I. U.G.	39,89	29,43	25,55	23,92	22,90
K.I. O.G.	40,90	29,99	25,95	24,29	23,14

Tab. 5.23: Verweilzeitverteilung bei Normalsteuerung , Typ I , Ankunftsverteilung IV , in sec

Anzahl Auf- züge / Ziel- etage	2	3	4	5	6
2	87,19	40,35	30,36	23,90	21,00
3	99,74	48,19	36,17	29,12	24,87
4	110,15	56,33	43,20	33,67	29,37
5	121,00	67,12	50,75	41,29	35,41
6	132,54	75,26	59,76	47,86	40,63
7	142,83	82,59	62,96	52,47	44,35
8	157,46	92,40	73,79	58,98	51,02
9	169,81	101,66	78,81	65,19	55,80
10	179,77	110,96	88,47	70,32	60,66
Total	133,01	74,62	57,84	46,72	40,11
K.I. U.G.	122,38	72,61	55,98	45,25	39,11
K.I. O.G.	143,64	76,63	59,71	48,20	41,11

Tab. 5.24: Verweilzeitverteilung bei Zonensteuerung , Typ I , Ankunftsverteilung IV , in sec

Anzahl Auf- züge / Ziel- etage	2	3	4	5	6
2	70,16	41,22		27,81	←
3	80,95	48,05	←	33,93	—
4	94,66	57,51	—	42,82	←
5	108,54	56,03	44,25	52,14	—
6	120,64	67,29	53,26	48,01	←
7	76,31	78,98	53,47	58,48	—
8	90,10	66,35	64,07	57,85	44,17
9	103,27	78,84	58,37	67,13	49,69
10	117,36	92,03	70,32	49,09	←
Total	95,61	65,20	54,49	49,58	46,01
K.I. U.G.	93,44	64,15	53,81	49,00	45,46
K.I. O.G.	97,79	66,24	55,17	50,17	46,55

Tab. 5.25: Warte-, Reise- und Verweilzeiten bei Normalsteuerung, Typ II , poissonverteilte Ankünfte mit μ = 2,8583 , 3 Aufzüge

Zieletage	Wartezeit	Reisezeit	Verweilzeit
2	29,46	13,27	42,73
3	27,58	21,27	48,86
4	28,18	29,73	57,91
5	28,57	40,17	68,75
6	27,87	50,32	78,20
7	27,78	58,30	86,07
8	29,06	70,36	99,42
9	28,57	77,89	106,47
10	29,51	89,06	118,57
Total	28,42	49,69	78,11
K.I. U.G.	27,18	48,83	76,10
K.I. O.G.	29,66	50,55	55,77

Tab. 5.26: Warte-, Reise- und Verweilzeiten bei Zonensteuerung, Typ II , poissonverteilte Ankünfte mit μ = 2,8583 , 3 Aufzüge

Zieletage	Wartezeit	Reisezeit	Verweilzeit
2	26,65	13,31	39,96
3	29,65	21,96	51,61
4	29,03	31,47	60,50
5	39,11	19,24	58,36
6	39,09	30,79	69,88
7	39,31	42,58	81,89
8	43,74	24,67	68,41
9	42,21	37,23	79,44
10	42,08	48,88	90,97
Total	36,78	30,29	67,07
K.I. U.G.	36,13	30,03	66,25
K.I. O.G.	37,43	30,54	67,89

Tab. 5.27: Parameter der Wartezeitverteilungen bei empirischer Zielverteilung und poissonverteilten Ankünften , Typ III , in sec

Durchschn. Zahl Ankünfte in 15 sec	Durchschn. Wartezeit		Varianz	
	Norm.st.	Zonenst.	Normst.	Zonenst.
0,5	3,22	8,22	0,002	0,317
1	3,52	13,09	0,006	0,614
1,5	4,18	16,93	0,058	0,667
2	5,31	20,10	0,101	1,420
2,5	7,08	22,54	0,465	1,084
3	9,35	24,83	1,082	1,133
3,5	11,04	26,61	1,016	1,952
4	13,33	27,77	2,419	1,137
4,5	15,87	29,40	1,964	1,519
5	17,69	30,18	4,876	1,522
5,5	19,21	31,61	3,185	3,801
6	21,06	32,83	6,728	2,650
6,5	23,02	33,56	5,790	5,204
7	25,14	35,77	10,540	6,623
7,5	29,54	36,96	43,826	11,012
8	38,25	40,17	167,94	29,630
8,5	70,89	46,10	1266,18	117,627
9	.	69,92	.	833,260
9,5	.	137,62	.	1689,4
10	.	210,69	.	5888,6
10,5	.	299,46	.	18157,
11	.	365,00	.	33846,
11,5	.	397,04	.	40199,

Tab. 5.28: Parameter der Reisezeitverteilungen bei empirischer Zielverteilung und poissonverteilten Ankünften , Typ III , in sec

Durchschn. Zahl Ankünfte in 15 sec	Durchschn. Reisezeit		Varianz	
	Norm.st.	Zonenst.	Norm.st.	Zonenst.
0,5	21,19	20,32	0,059	0,042
1	22,43	20,85	0,147	0,052
1,5	24,05	21,51	0,286	0,062
2	26,39	22,20	0,455	0,049
2,5	29,89	22,81	1,066	0,064
3	33,91	23,46	2,196	0,092
3,5	37,84	24,00	3,389	0,100
4	41,79	24,42	3,937	0,117
4,5	45,26	24,90	3,878	0,090
5	47,88	25,31	2,260	0,113
5,5	50,12	25,71	2,928	0,156
6	52,60	26,10	2,541	0,106
6,5	53,80	26,45	2,650	0,128
7	56,09	26,90	2,615	0,143
7,5	57,54	27,21	2,301	0,182
8	58,78	27,63	2,219	0,164
8,5	59,79	28,01	3,075	0,122
9	.	28,36	.	0,144
9,5	.	28,61	.	0,157
10	.	28,83	.	0,109
10,5	.	28,96	.	0,155
11	.	29,00	.	0,138
11,5	.	29,12	.	0,108

Tab. 5.29: Parameter der Verweilzeitverteilungen bei empirischer Zielverteilung und poissonverteilten Ankünften , Typ III , in sec

Durchschn. Zahl Ankünfte in 15 sec	Durchschn. Verweilzeit		Varianz	
	Norm.st.	Zonenst.	Norm.st.	Zonenst.
0,5	24,42	28,54	0,073	0,429
1	25,95	33,94	0,190	0,841
1,5	28,23	38,44	0,516	0,904
2	31,71	42,30	0,775	1,657
2,5	36,97	45,35	2,814	1,386
3	43,25	48,29	6,027	1,544
3,5	48,87	50,61	7,162	2,411
4	55,12	52,19	10,418	1,655
4,5	61,12	54,31	9,802	2,036
5	65,57	55,49	11,430	2,202
5,5	69,33	57,32	8,961	4,519
6	73,66	58,93	16,324	3,204
6,5	76,82	60,01	13,777	6,147
7	81,23	62,67	19,730	7,671
7,5	87,08	64,17	53,449	12,790
8	97,00	67,79	186,949	32,332
8,5	130,68	74,10	1279,560	122,387
9	.	98,28	.	842,957
9,5	.	166,22	.	1701,85
10	.	239,46	.	5915,50
10,5	.	328,42	.	18203,
11	.	394,01	.	33888,
11,5	.	426,16	.	40222,

Tab. 5.30: Parameter der Wartezeitverteilungen bei einer Gleichverteilung der Ziele und poissonverteilten Ankünften , Typ IV , in sec

Durchschn. Zahl Ankünfte in 15 sec	Durchschn. Wartezeit		Varianz	
	Norm.st.	Zonenst.	Norm.st.	Zonenst.
0,5	3,22	7,69	0,002	0,171
1	3,51	12,05	0,006	0,801
1,5	4,15	15,65	0,055	0,377
2	5,22	18,58	0,069	0,952
2,5	6,86	21,18	0,499	1,087
3	9,31	23,05	1,340	0,877
3,5	11,53	25,24	1,563	2,163
4	13,67	26,39	1,480	1,157
4,5	15,46	27,67	2,478	0,877
5	17,64	29,27	2,581	0,702
5,5	19,86	30,15	5,121	2,636
6	22,04	30,35	6,994	2,607
6,5	23,53	32,21	9,425	1,877
7	26,77	32,74	11,139	3,106
7,5	34,52	33,80	93,061	4,269
8	64,84	35,10	1811,280	4,316
8,5	314,56	35,83	18177,	3,310
9	.	36,92	.	2,936
9,5	.	38,46	.	4,765
10	.	40,60	.	15,519
10,5	.	42,35	.	14,160
11	.	46,40	.	34,034
11,5	.	54,34	.	43,918
12	.	85,08	.	497,5
12,5	.	125,67	.	1856,1
13	.	185,89	.	6173,4

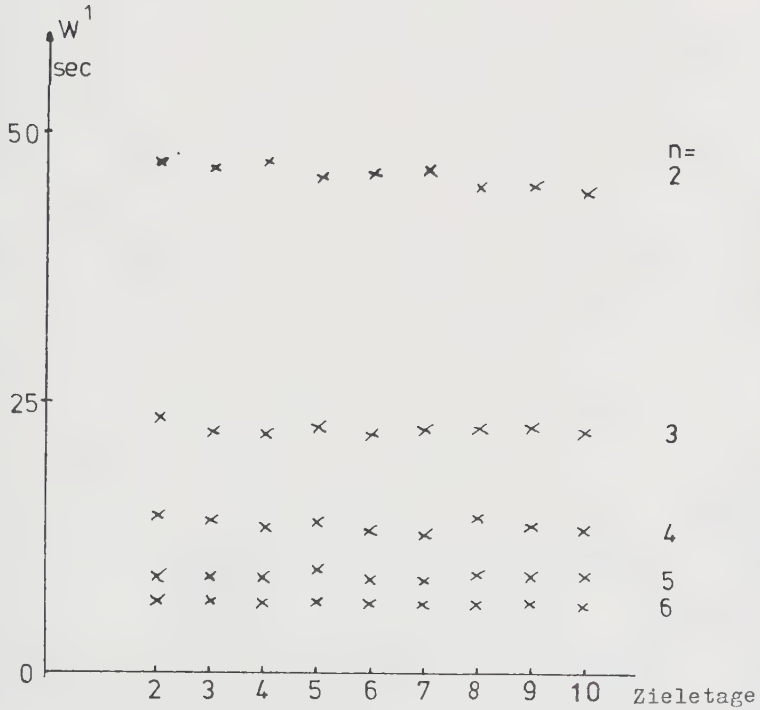
Tab. 5.31: Parameter der Reisezeitverteilungen bei einer Gleichverteilung der Ziele und poissonverteilten Ankünften , Typ IV , in sec

Durchschn. Zahl Ankünfte in 15 sec	Durchschn. Reisezeit		Varianz	
	Norm.st.	Zonenst.	Norm.st.	Zonenst.
0,5	20,40	19,48	0,087	0,050
1	21,65	19,96	0,176	0,057
1,5	23,30	20,58	0,342	0,083
2	25,60	21,21	0,458	0,086
2,5	29,38	21,89	1.662	0,128
3	34,09	22,49	3,243	0,143
3,5	38,42	23,09	3,966	0,093
4	42,77	23,57	5,429	0,073
4,5	46,52	24,05	4,536	0,102
5	50,13	24,47	5,814	0,163
5,5	52,25	24,85	3,648	0,179
6	54,84	25,27	3,760	0,150
6,5	57,33	25,66	6,116	0,125
7	58,89	25,97	3,192	0,125
7,5	60,73	26,31	3,445	0,170
8	62,45	26,63	3,940	0,190
8,5	63,51	26,99	1,90	0,200
9	.	27,34	.	0,247
9,5	.	27,68	.	0,170
10	.	27,99	.	0,228
10,5	.	28,34	.	0,135
11	.	28,64	.	0,311
11,5	.	28,95	.	0,267
12	.	29,20	.	0,172
12,5	.	29,39	.	0,253
13	.	29,52	.	0,210

Tab. 5.32: Parameter der Verweilzeitverteilungen bei einer Gleichverteilung der Ziele und poissonverteilten Ankünften , Typ IV , in sec

Durchschn. Zahl Ankünfte in 15 sec	Durchschn. Verweilzeit		Varianz	
	Norm.st.	Zonenst.	Norm.st.	Zonenst.
0,5	23,62	27,17	0,104	0,295
1	25,17	32,01	0,220	1,085
1,5	27,45	36,23	0,573	0,592
2	30,83	39,80	0,777	1,221
2,5	36,24	43,07	3,712	1,460
3	43,41	45,54	8,050	1,377
3,5	49,94	48,32	9,845	2,625
4	56,44	49,96	10,950	1,483
4,5	61,98	51,72	12,048	1,374
5	67,76	53,74	14,645	1,224
5,5	72,11	55,01	14,543	3,792
6	76,88	55,63	16,617	3,153
6,5	80,86	57,87	23,793	2,528
7	85,66	58,71	23,211	4,180
7,5	95,25	60,11	122,867	5,424
8	127,29	61,73	1908,297	5,638
8,5	378,11	62,82	18297,	4,393
9	.	64,26	.	4,020
9,5	.	66,14	.	5,527
10	.	68,59	.	18,207
10,5	.	70,68	.	15,390
11	.	75,05	.	38,380
11,5	.	83,29	.	48,195
12	.	114,28	.	504,195
12,5	.	155,06	.	1871,3
13	.	215,41	.	6199,6

Abb. 5.1: Wartezeitverteilung bei Normalsteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung I, n Aufzüge



---

1 Zu den Abkürzungen in den folgenden Abbildungen:

W : Durchschnittliche Wartezeit
R : Durchschnittliche Reisezeit
V : Durchschnittliche Verweilzeit

N : Normalsteuerung
Z : Zonensteuerung

Abb. 5.2: Wartezeitverteilung bei Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung I, n Aufzüge

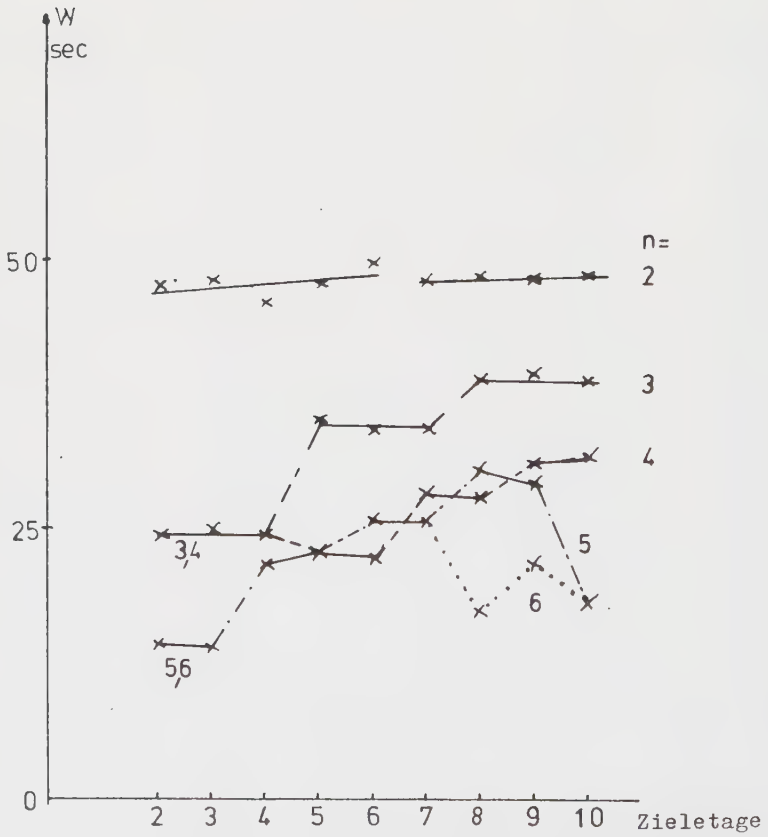


Abb. 5.3: Reisezeitverteilung bei Normalsteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung I, ´n Aufzüge

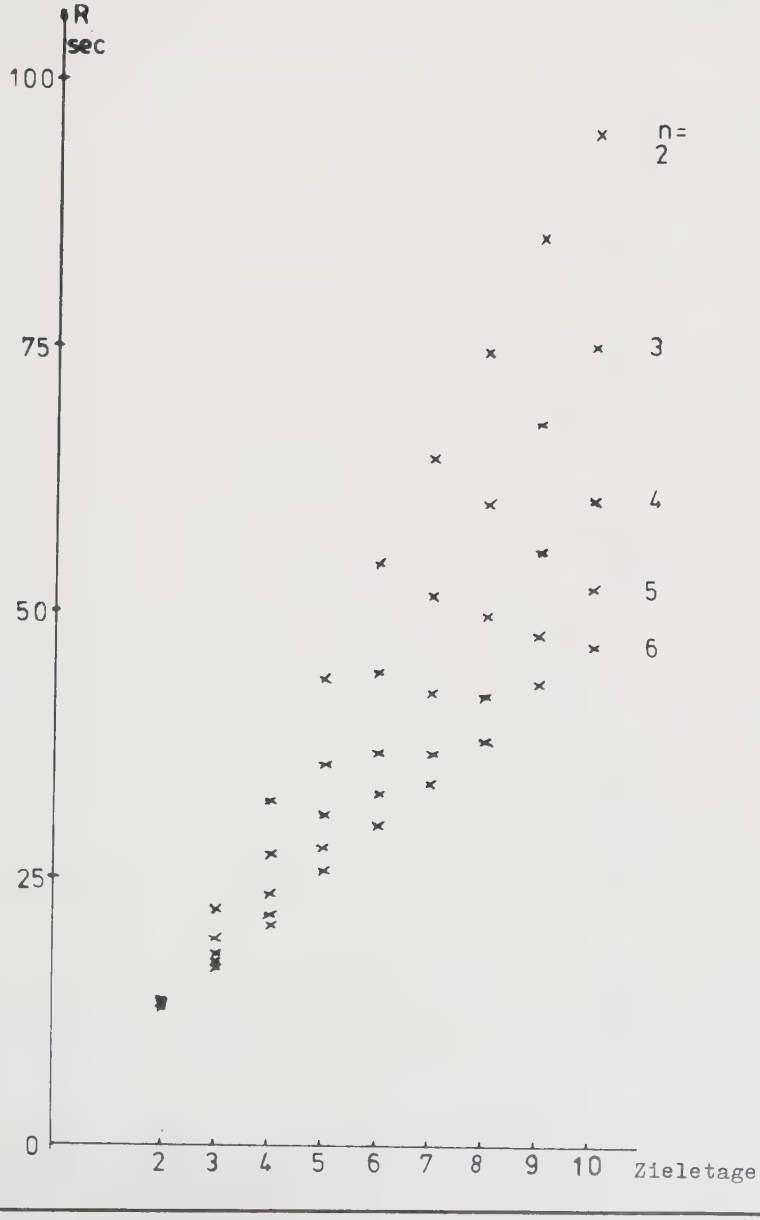


Abb. 5.4: Reisezeitverteilung bei Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung I, n Aufzüge

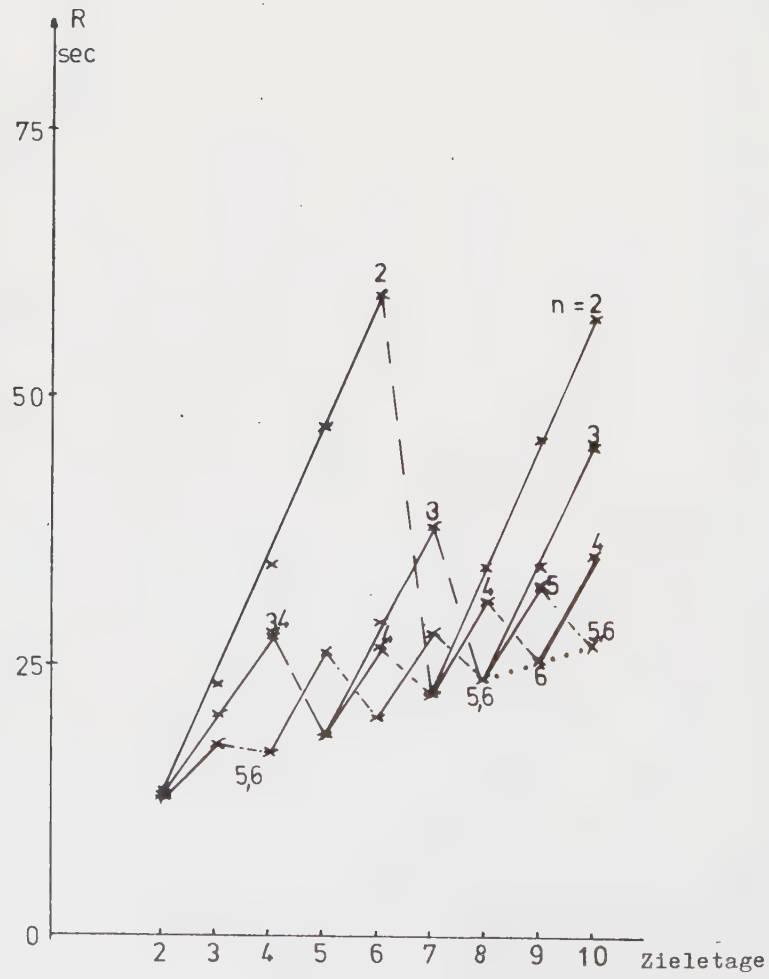


Abb. 5.5: Verweilzeitverteilung bei Normalsteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung I, n Aufzüge

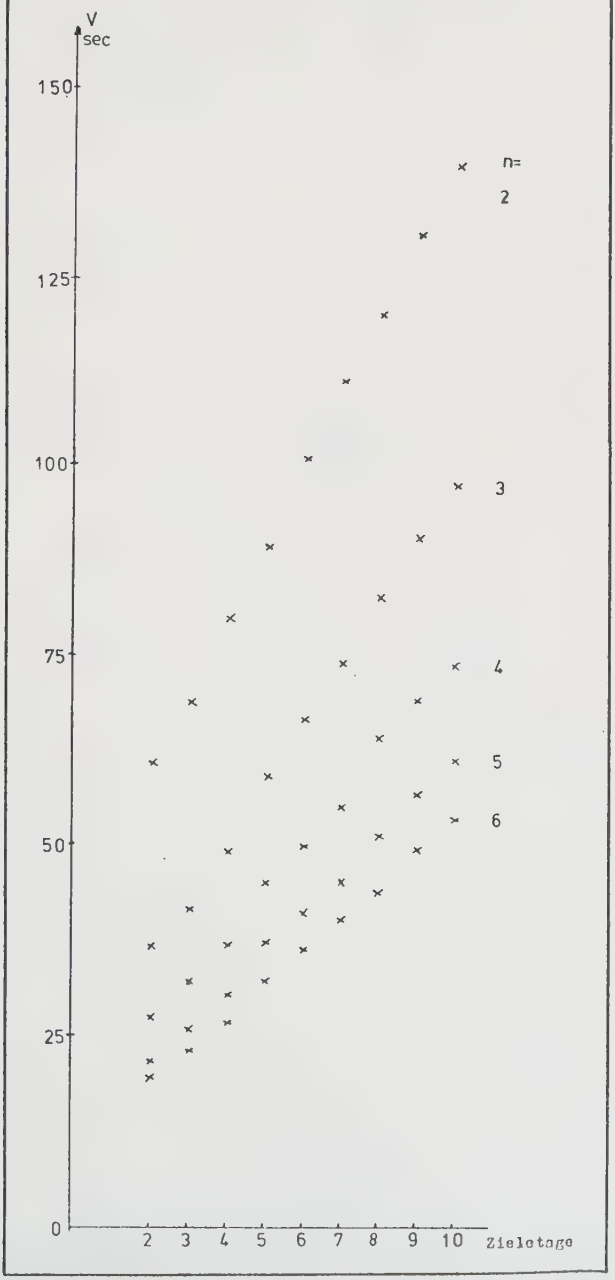


Abb. 5.6: Verweilzeitverteilung bei Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung I, n Aufzüge

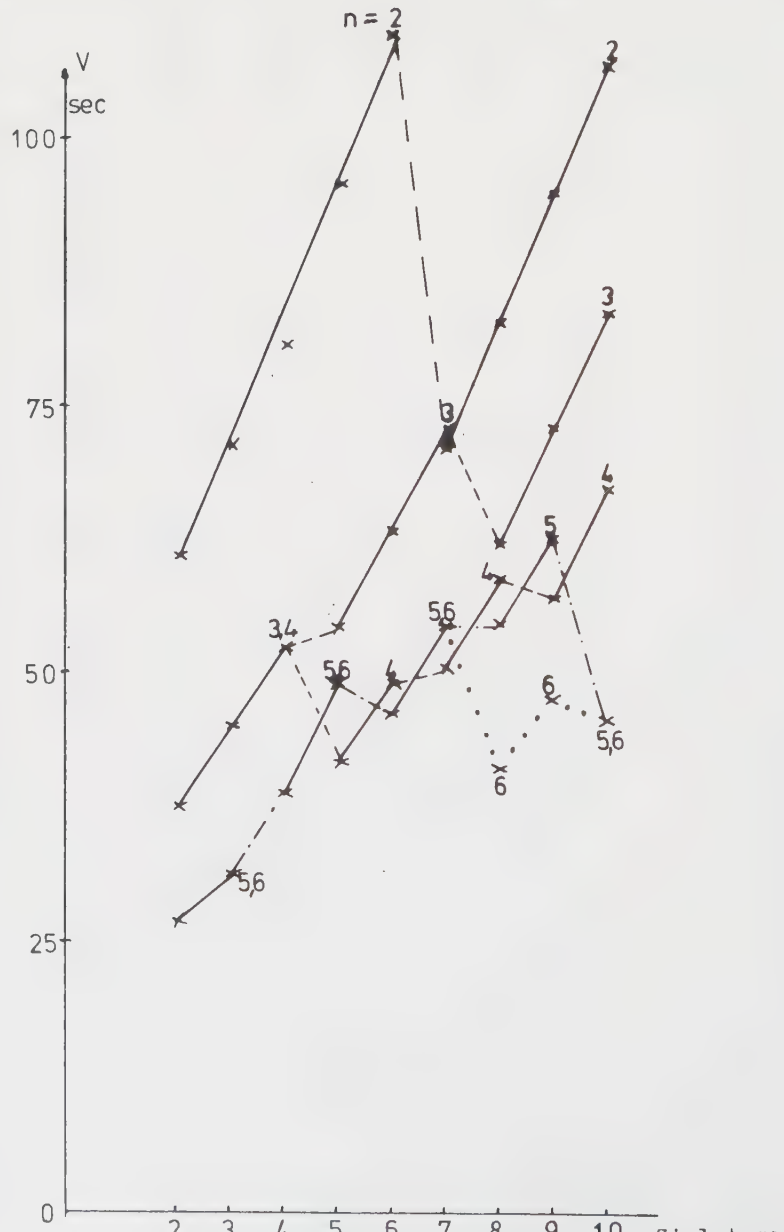


Abb. 5.7: Totale durchschnittliche Warte-, Reise- und Verweilzeiten bei Normalsteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung I, n Aufzüge

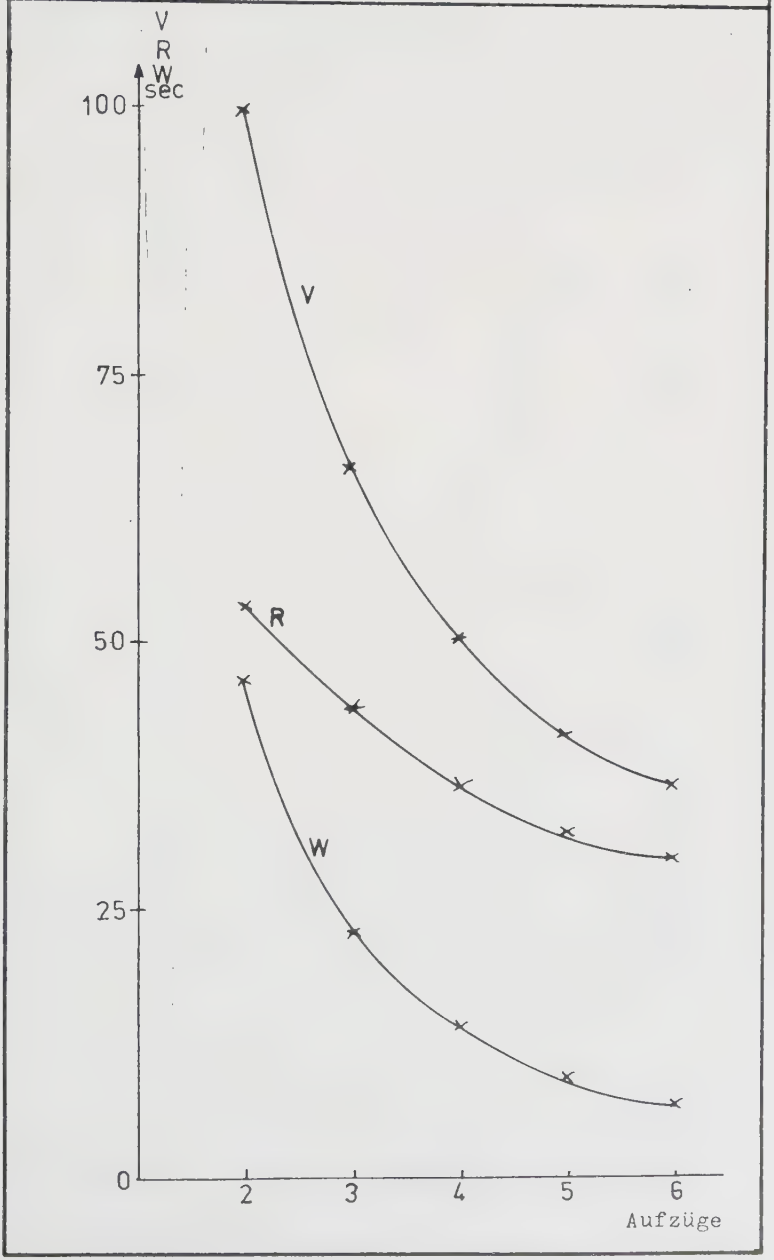


Abb. 5.8: Totale durchschnittliche Warte-, Reise- und Verweilzeiten bei Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung I, n Aufzüge

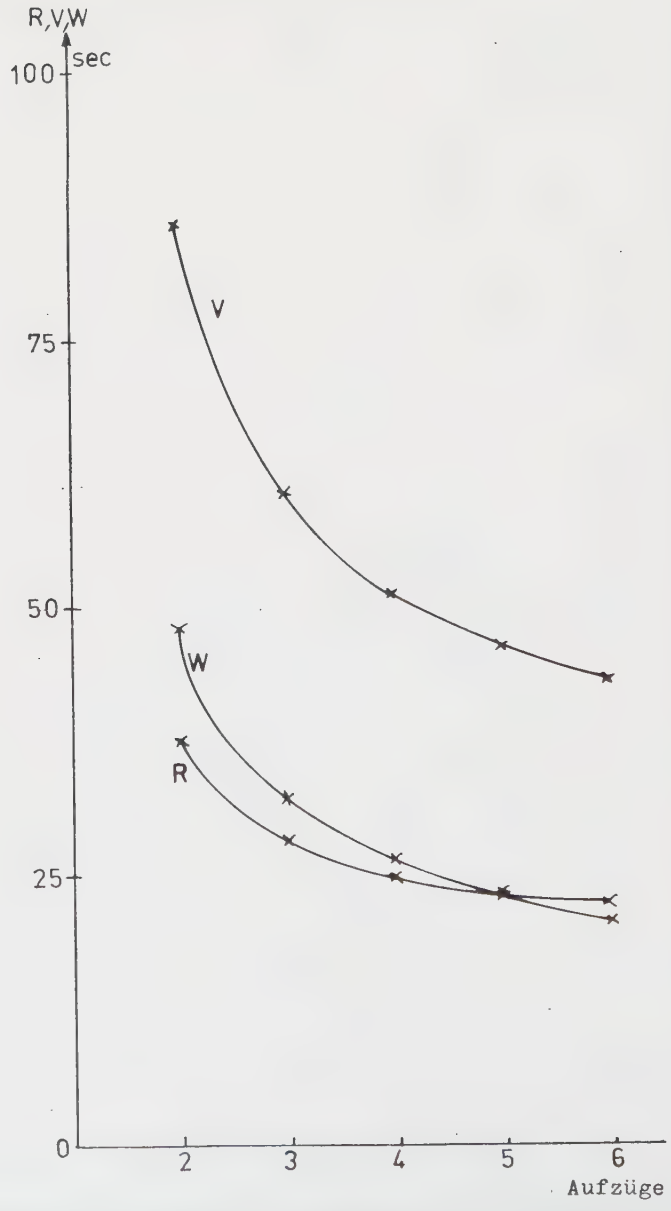


Abb. 5.9: Totale durchschnittliche Wartezeiten bei Normal- und Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung I, n Aufzüge

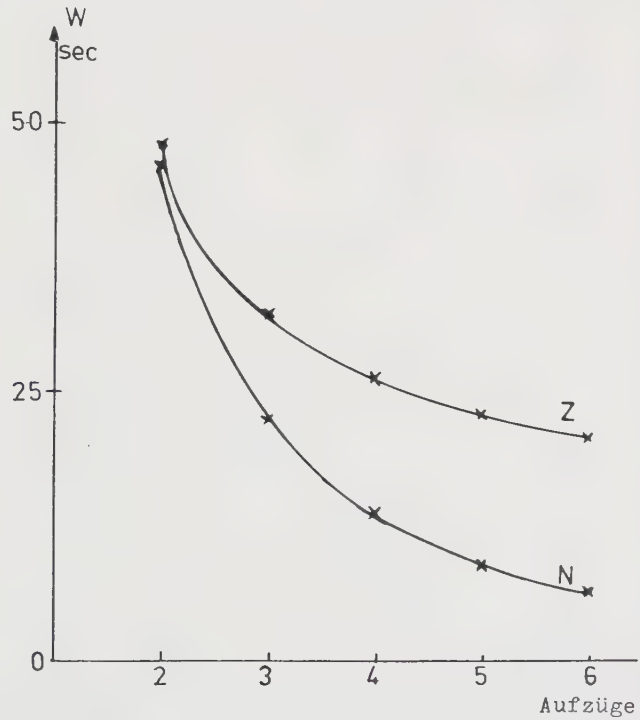


Abb. 5.10: Totale durchschnittliche Reisezeiten bei Normal- und Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung I, n Aufzüge

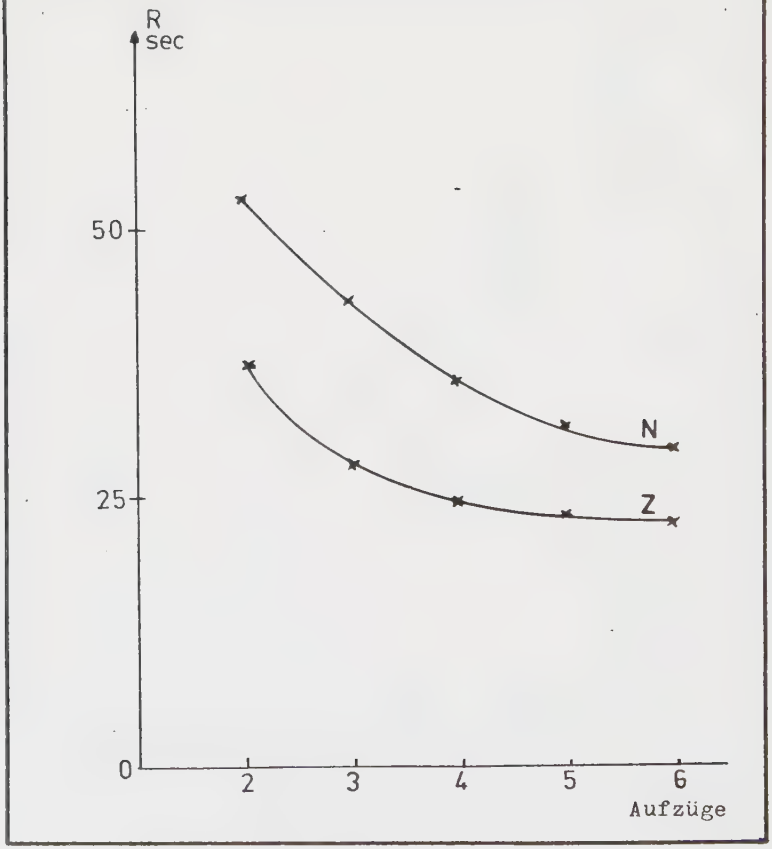


Abb. 5.11: Totale durchschnittliche Verweilzeiten bei Normal- und Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung I, n Aufzüge

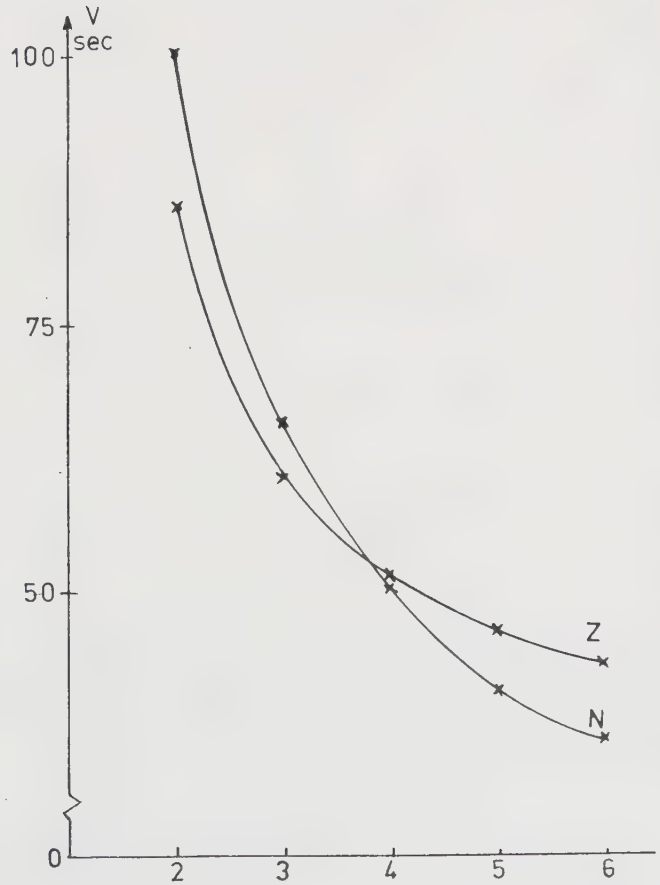


Abb. 5.12: Wartezeitverteilung bei Normalsteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung II, n Aufzüge

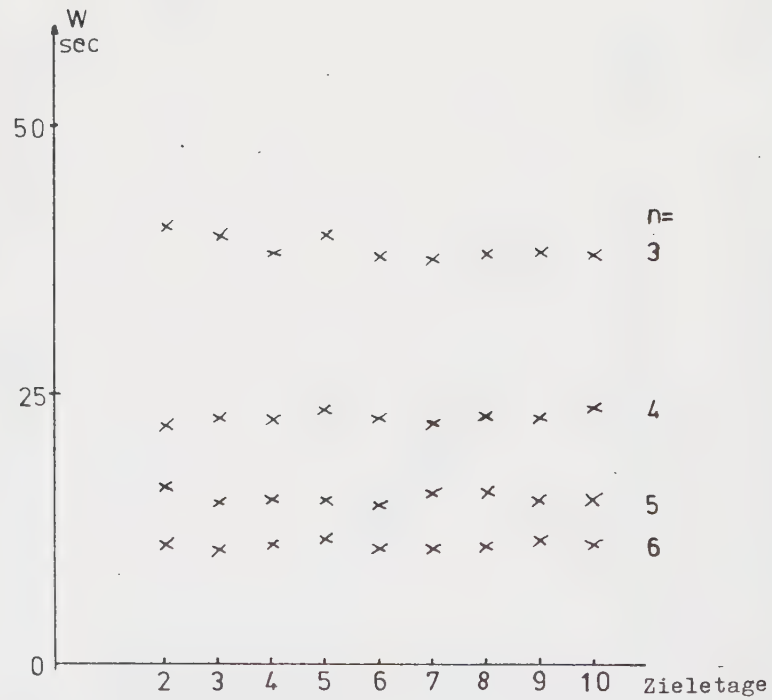


Abb. 5.13: Wartezeitverteilung bei Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung II, n Aufzüge

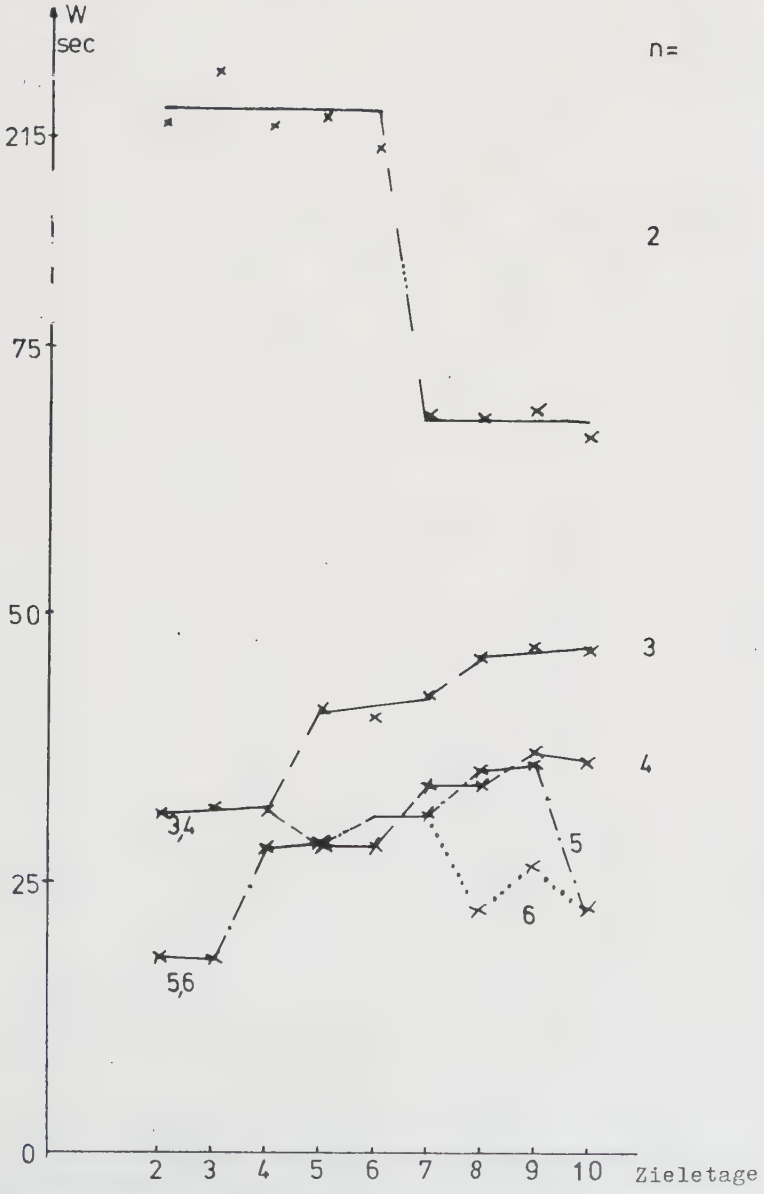


Abb. 5.14: Reisezeitverteilung bei Normalsteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung II, n Aufzüge

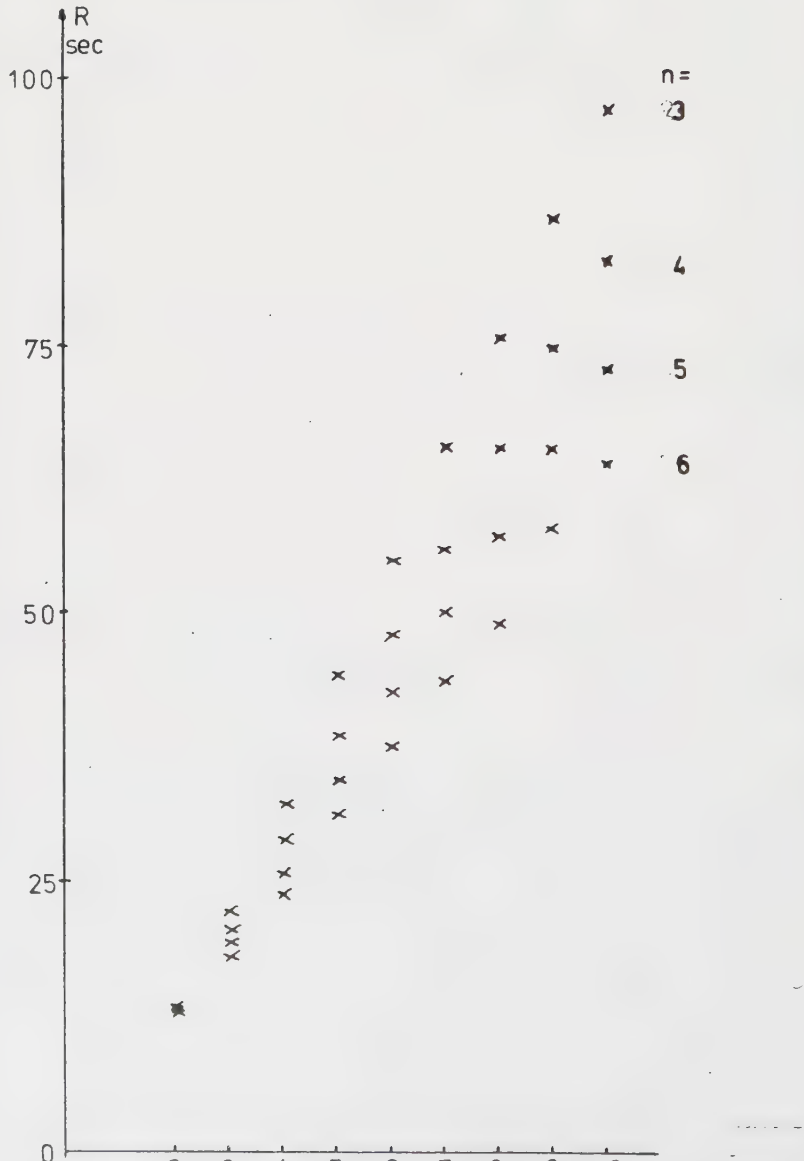


Abb. 5.15: Reisezeitverteilung bei Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung II, n Aufzüge

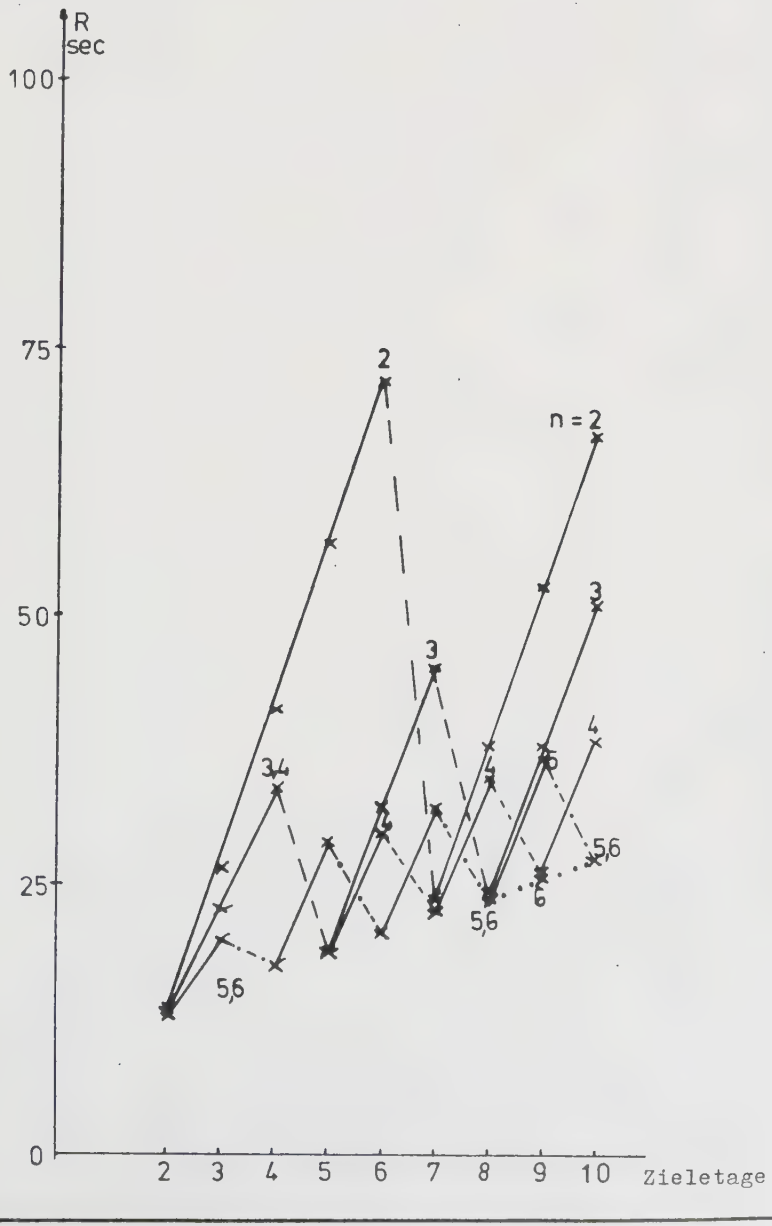


Abb. 5.16: Verweilzeitverteilung bei Normalsteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung II, n Aufzüge

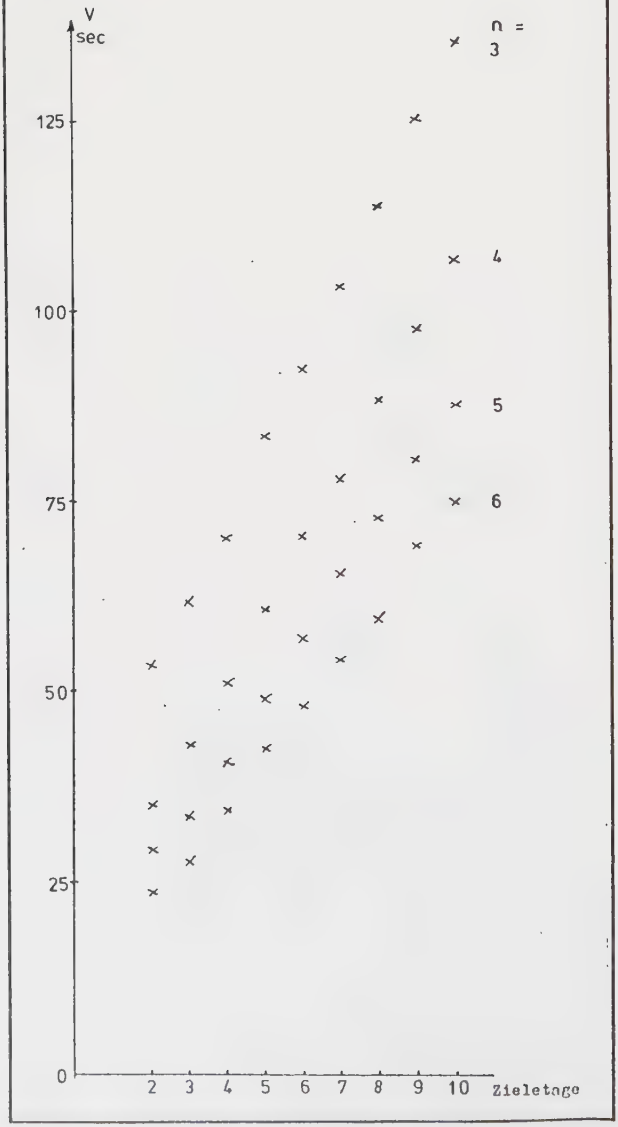


Abb. 5.17: Verweilzeitverteilung bei Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung II, n Aufzüge

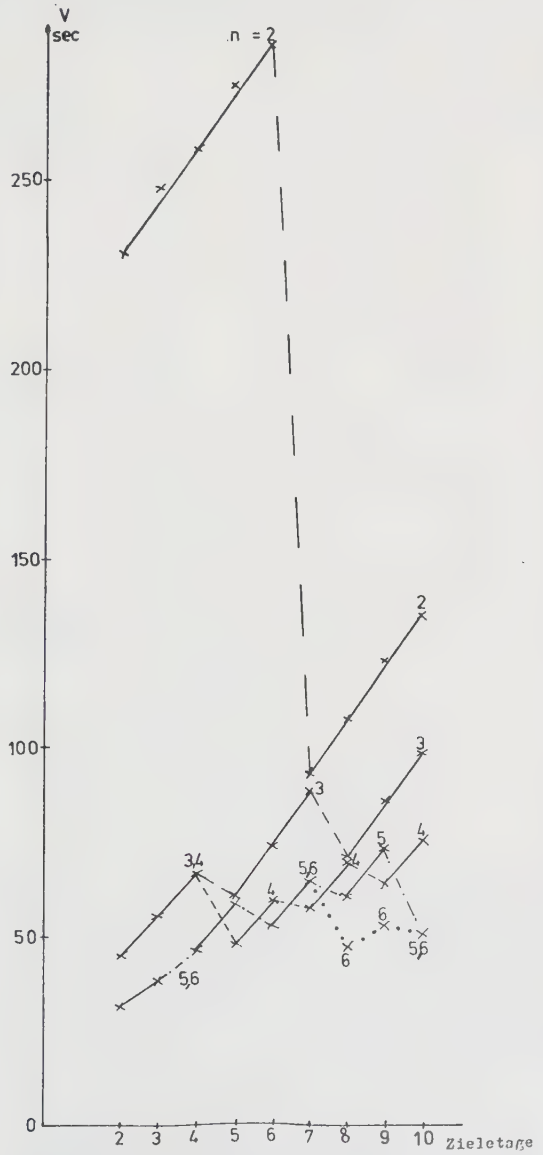


Abb. 5.18: Totale durchschnittliche Warte-, Reise- und Verweilzeiten bei Normalsteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung II, n Aufzüge

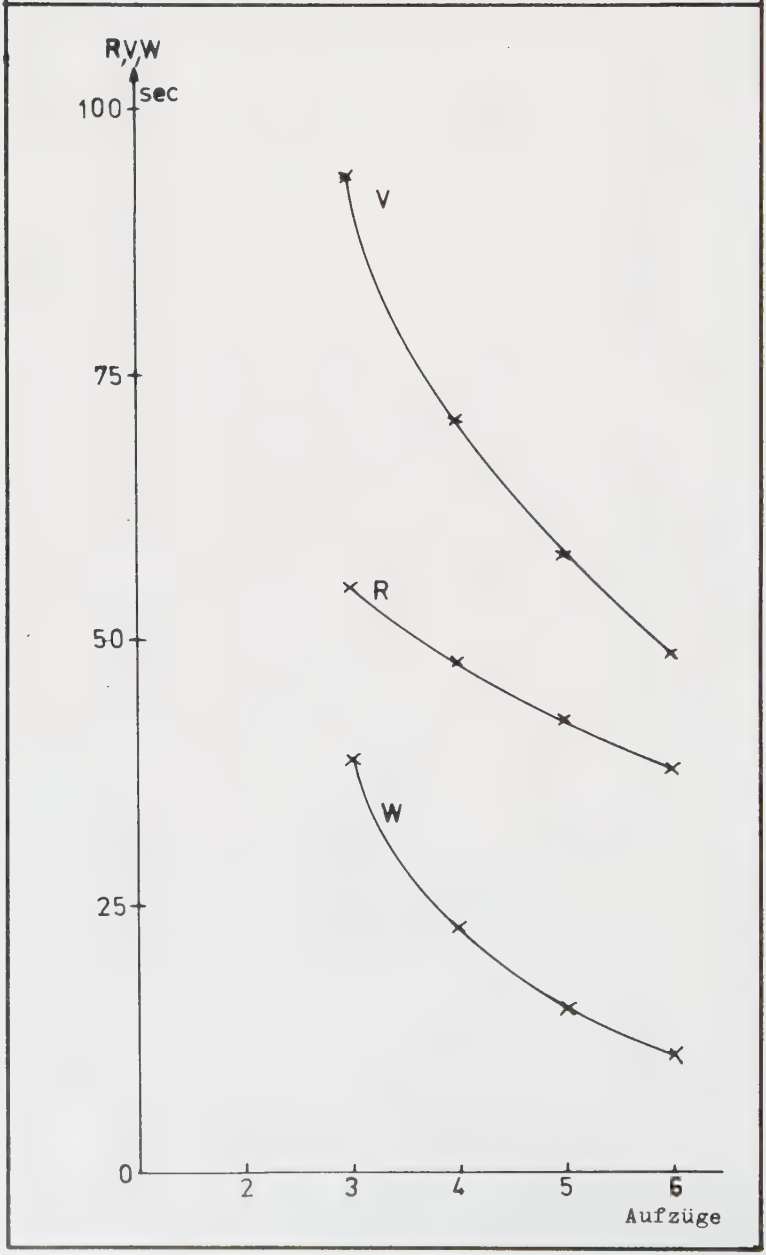


Abb. 5.19: Totale durchschnittliche Warte-, Reise- und Verweilzeiten bei Zonensteuerung, Typ I , Ankunftsverteilung II, n Aufzüge

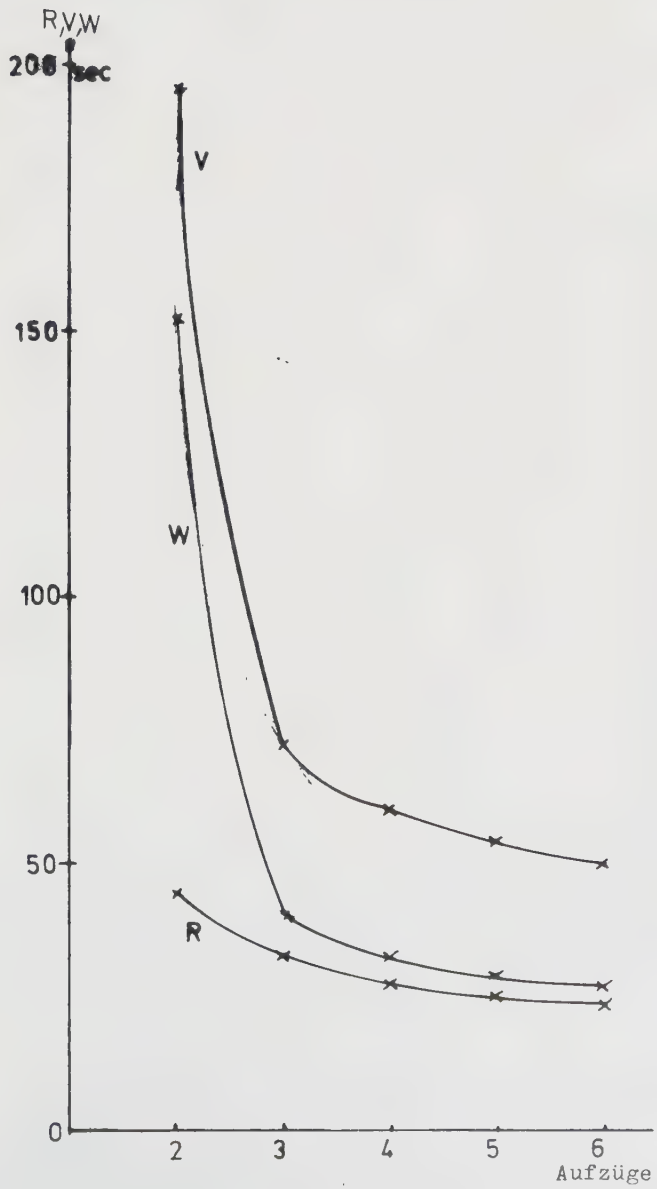


Abb. 5.20: Totale durchschnittliche Wartezeiten bei Normal- und Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung II, n Aufzüge

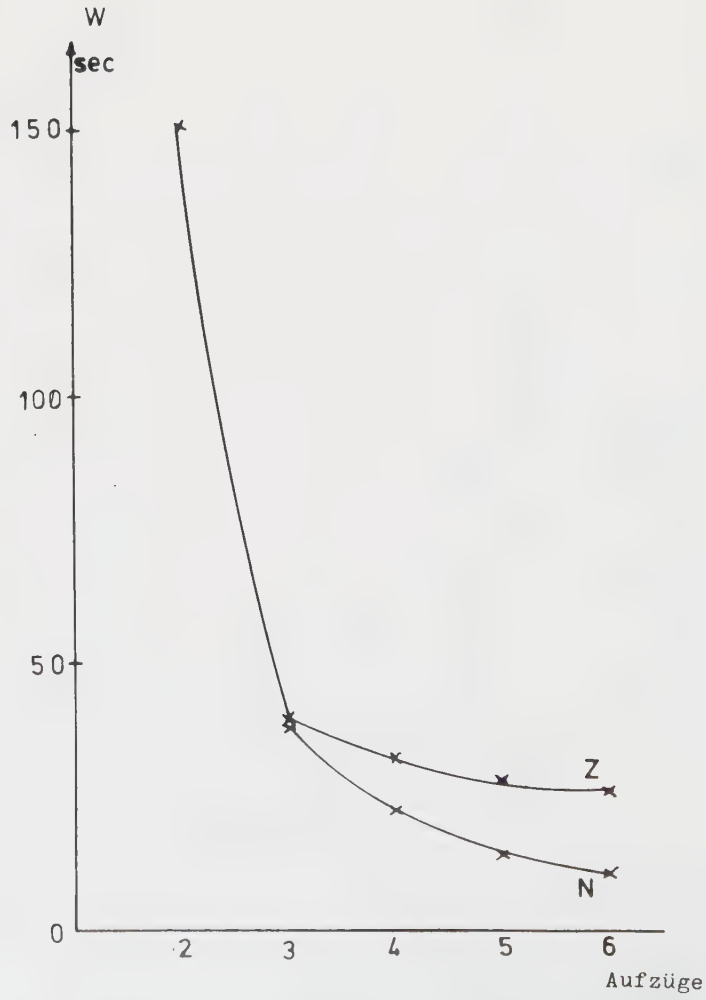


Abb. 5.21: Totale durchschnittliche Reisezeiten bei Normal- und Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung II, n Aufzüge

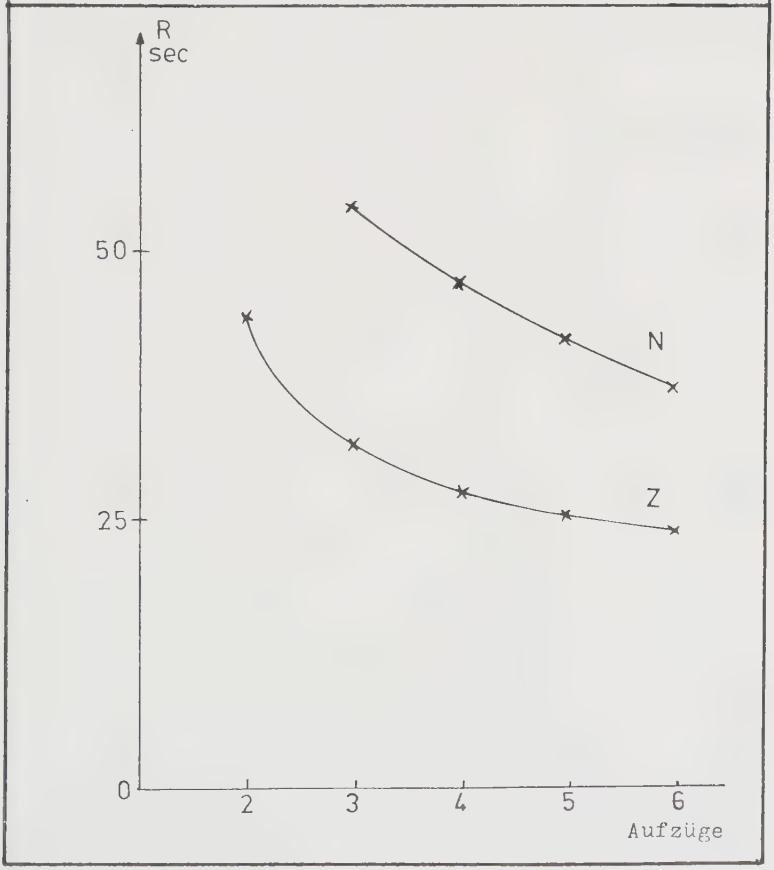


Abb. 5.22: Totale durchschnittliche Verweilzeiten bei Normal- und Zonensteuerung, Typ I, Ankunftsverteilung II, n Aufzüge

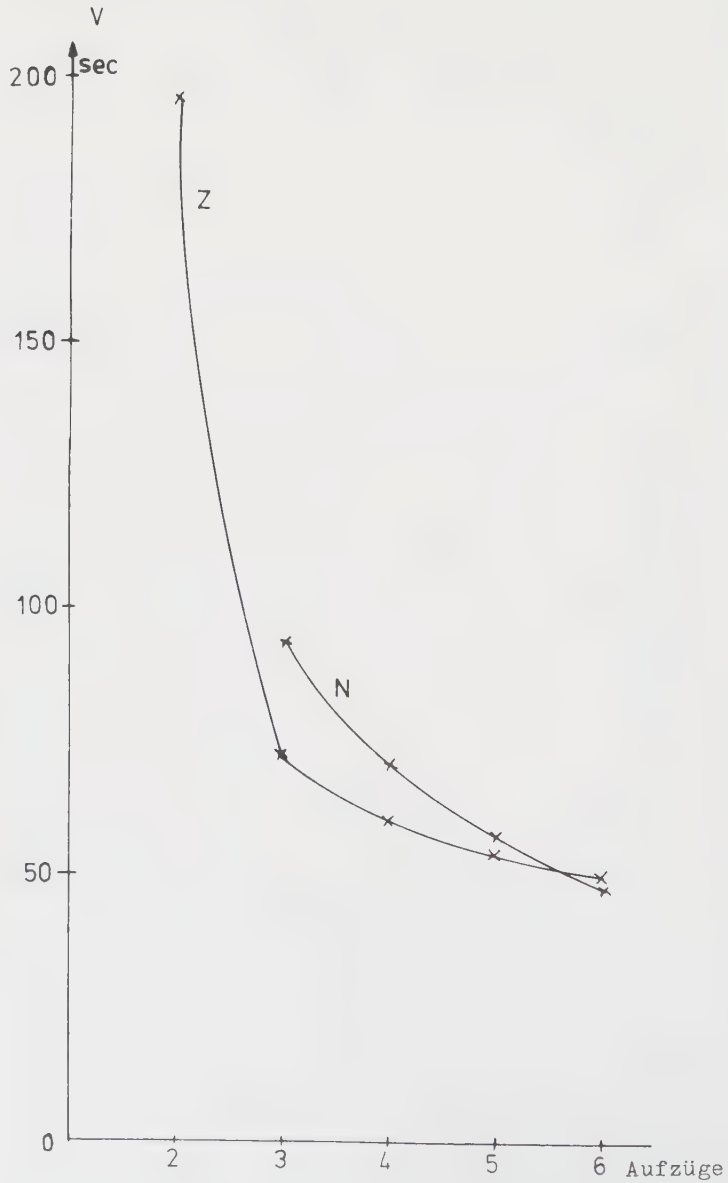


Abb. 5.23: Totale durchschnittliche Wartezeiten bei Normal- und Zonensteuerung als Funktion von $\mu_{poisson}$ der Ankunftsverteilung - bei empirischer Zielverteilung und n = 6 Aufzügen

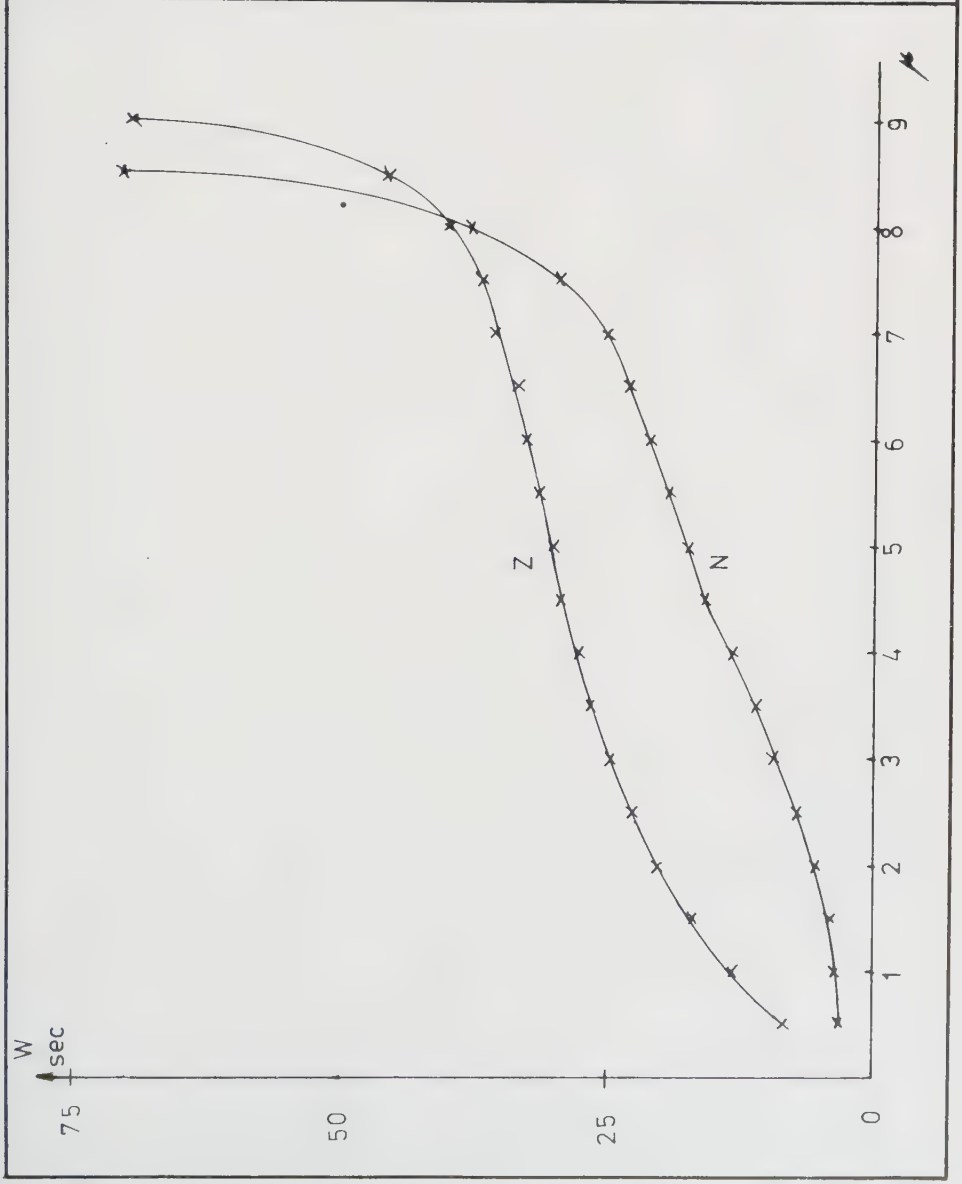


Abb. 5.24: Totale durchschnittliche Reisezeiten bei Normal- und Zonensteuerung als Funktion von $\mu_{poisson}$ der Ankunftsverteilung - bei empirischer Zielverteilung und n = 6 Aufzügen

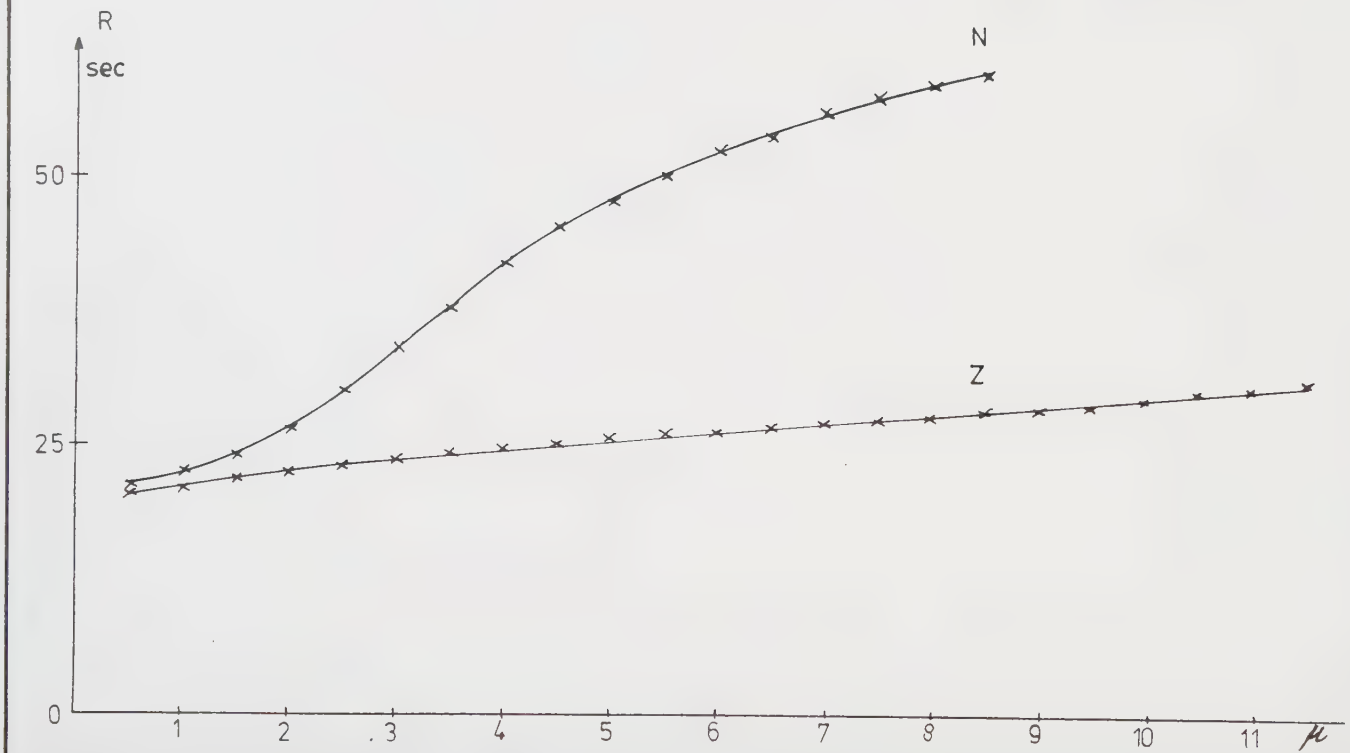
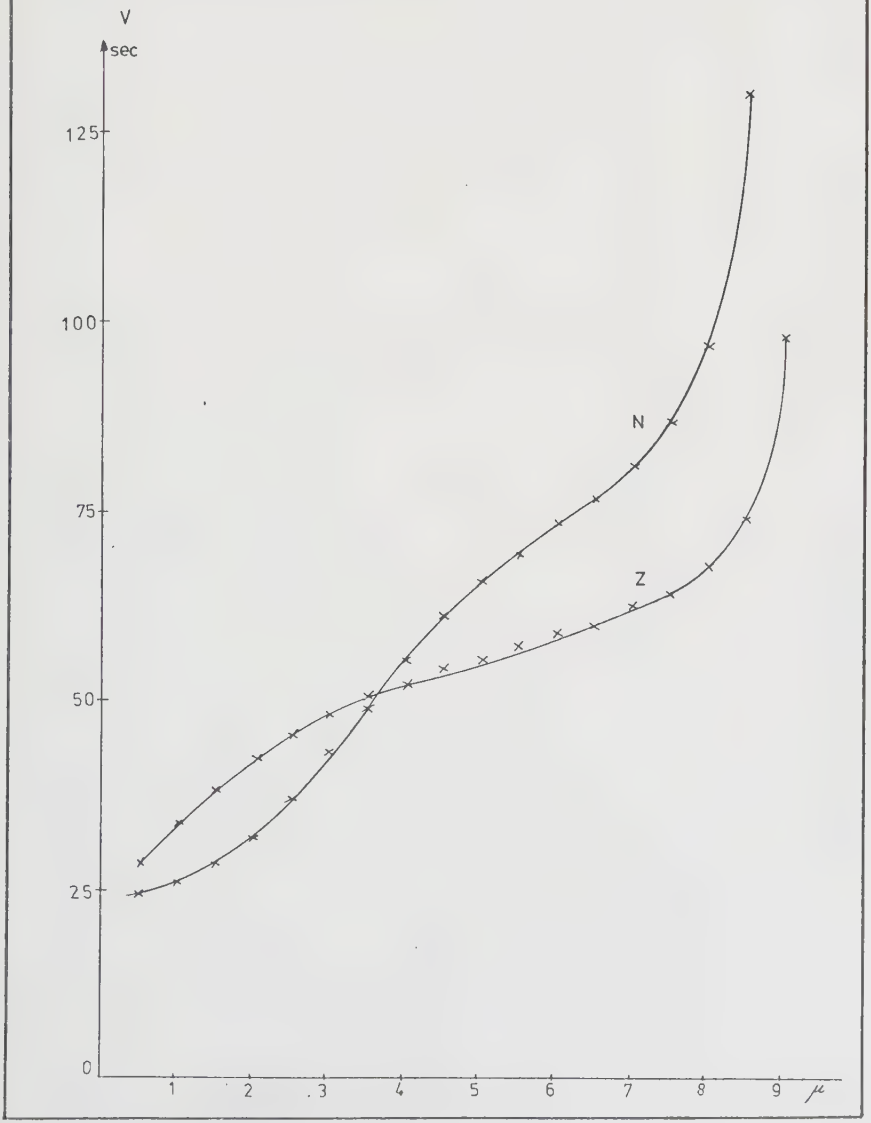


Abb. 5.25: Totale durchschnittliche Verweilzeiten bei Normal- und Zonensteuerung als Funktion von $\mu_{poisson}$ der Ankunftsverteilung - bei empirischer Zielverteilung und n = 6 Aufzügen



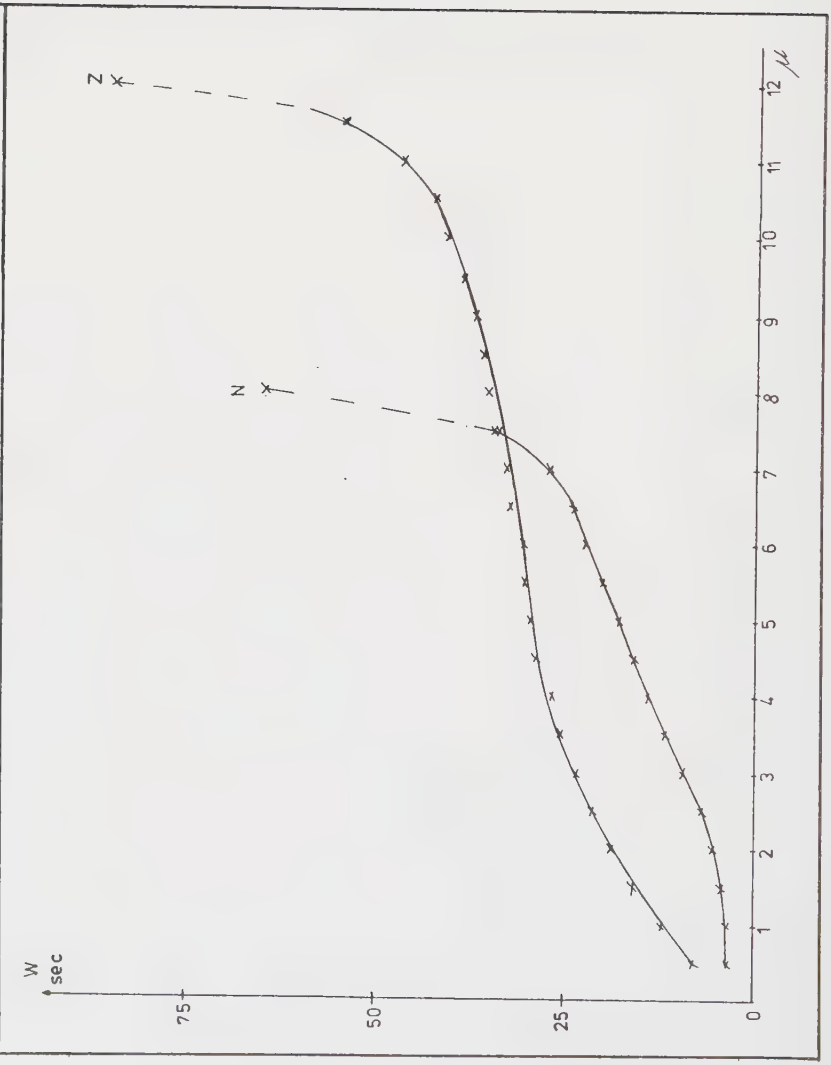


Abb. 5.26: Totale durchschnittliche Wartezeiten bei Normal- und Zonensteuerung als Funktion von $\mu_{Poisson}$ der Ankunftsverteilung - bei gleichverteilten Zielen und n = 6 Aufzügen

Abb. 5.27: Totale durchschnittliche Reisezeiten bei Normal- und Zonensteuerung als Funktion von $\mu_{poisson}$ der Ankunftsverteilung - bei gleichverteilten Zielen und n = 6 Aufzügen

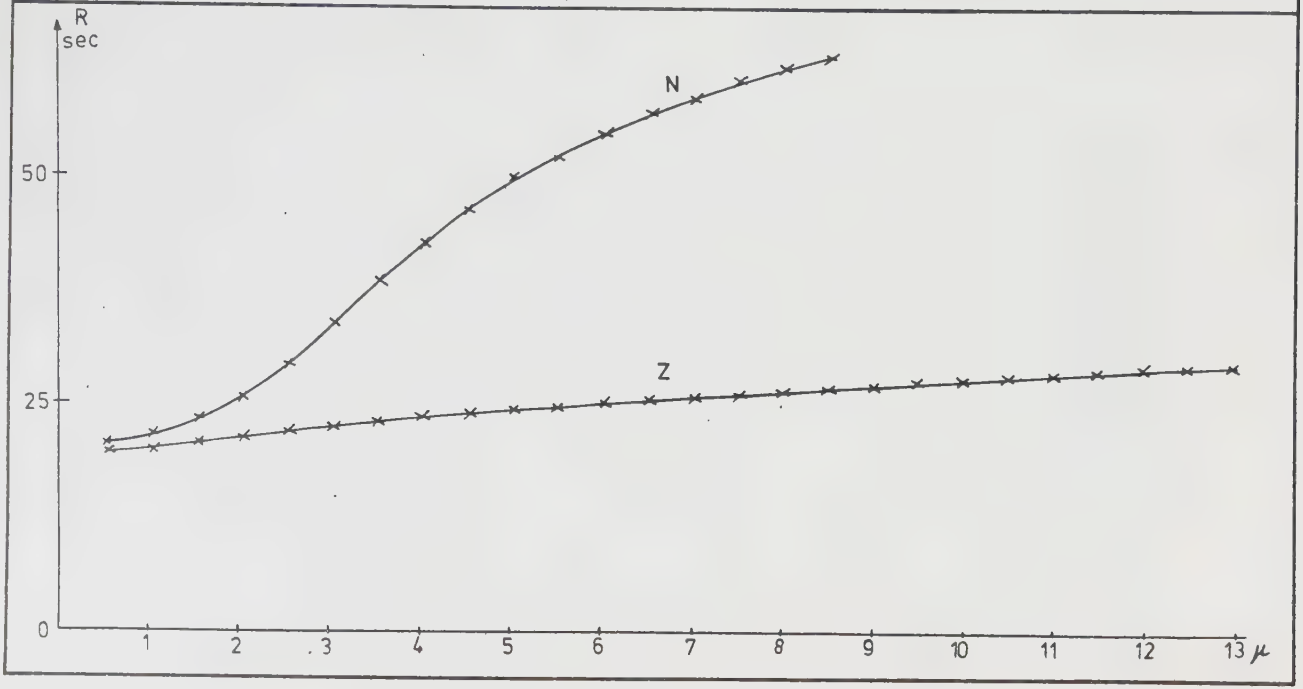
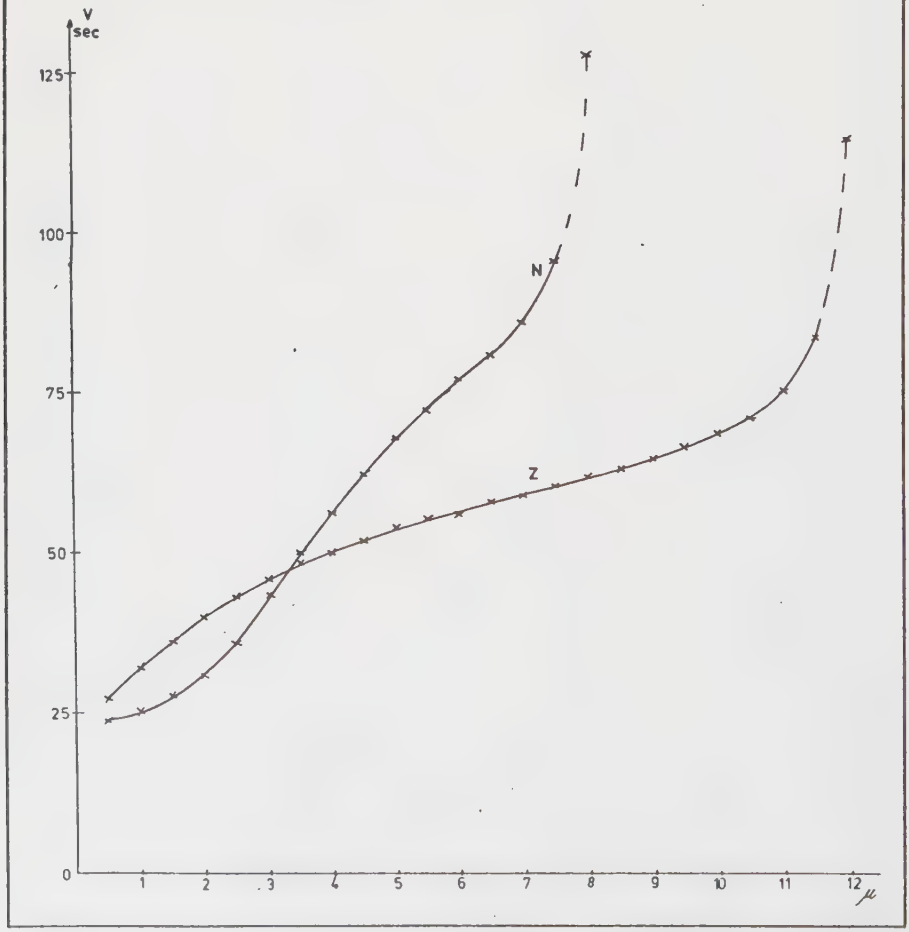


Abb. 5.29: Totale durchschnittliche Verweilzeiten bei Normal- und Zonensteuerung als Funktion von $\mu_{poisson}$ der Ankunftsverteilung - bei gleichverteilten Zielen und n = 6 Aufzügen



5.2 Die Analyse der Ergebnisse

5.2.1 Modelle des Typs I

Zunächst eine Vorbemerkung:
Falls das Aufzugssystem nur aus einem Aufzug besteht, kann man natürlich gar nicht von einer Gruppensammelsteuerung sprechen. Trotzdem wurde bei Modell 1 eine Simulation mit nur einem Aufzug vorgenommen. Es ergab sich, daß ein Fahrstuhl für den Verkehrsandrang nicht ausreichte. Das System hatte keinen Gleichgewichtszustand, die Wartezeiten und die Warteschlangen wurden mit fortlaufender Simulation immer größer.
Betrachten wir nun nacheinander die vorliegenden Tabellen und Abbildungen für die Modelle des Typs I, und dabei zunächst die Wartezeiten.
Die erste naheliegende Folgerung:
Werden die Aufzüge mithilfe der Normalsteuerung gesteuert, so ist die Wartezeit eines Benutzers von der Wahl seines Zielstockwerkes unabhängig. Der betreffende Benutzer kann ja unabhängig von seinem Ziel den nächsten eintreffenden Aufzug besteigen. In den Tabellen 5.1,5.7,5.13 und 5.19 lässt sich dieser Tatbestand ablesen, wenn man jeweils eine Spalte, also die Zahl der Aufzüge, festhält. Graphisch zeigt sich dies in den Abbildungen 5.1 und 5.12, wenn man die Punkte für für ein gegebenes n betrachtet. Legt man durch diese Punktwolken lineare Kleinste-Quadrate-Regressionsfunktionen, wird man lauter Geraden erhalten, deren Steigungen nicht signifikant von null verschieden sind. Die absoluten Glieder dieser Funktionen entsprechen ungefähr den durchschnittlichen Wartezeiten, gemittelt über alle Etagen.
Bei Modell 2 wurde für n=3 und n=6 Aufzüge eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt. Für die Wartezeiten in Abhängigkeit vom Zielgeschoß I ergibt sich bei n=3 ein ziemlich hoher negativer Korrelationskoeffizient von r=-0,678, der aber bei einem Signifikanzniveau von 95% - zweiseitig -

nicht gegen null gesichert ist. Die Regressionsfunktion lautet

$$W(I) = 40{,}38 - 0{,}2536\ I \quad .$$

Bei n=6 ergibt sich r=0,357, der Korrelationskoeffizient ist also ebenfalls nicht gegen null gesichert, die Regressionsfunktion lautet:

$$W(I) = 10{,}55 + 0{,}0515\ I \quad .$$

Betrachtet man die totalen durchschnittlichen Wartezeiten - jeweils die zehnte Zeile einer Tabelle, zeigt sich folgende Tendenz: ceteris paribus nimmt bei gleichmäßiger Erhöhung der Aufzugszahl die Wartezeit nicht etwa linear, sondern sehr stark degressiv ab. In den Abbildungen 5.7 und 5.18 ist dies graphisch dargestellt[1]. Vergleicht man diese Abb. noch miteinander, zeigt sich, daß die durchschnittlichen Wartezeiten bei Modell 1 jeweils unter denen bei Modell 2 liegen, weiter bewältigen im 1. Modell auch schon zwei Aufzüge den Verkehrsandrang, während im 2. mindestens drei Aufzüge benötigt werden.

Die Wartezeiten bei Zonensteuerung zeigen ein gänzlich anderes Bild.Hier sind im Gegensatz zur Normalsteuerung die Wartezeiten sehr wohl von der Wahl der Zieletage abhängig.Die Tabellen 5.2, 5.8, 5.14 und 5.20 sowie die Abbildungen 5.2 und 5.13 zeigen dies sehr deutlich. In den

---

[1] Der Definitionsbereich aller dargestellten sich aus der Simulation ergebenden Funktionen - Zahl der Aufzüge im System bzw. Zieletagennummer - in den Abb. 5.1 bis 5.22 ist eine Teilmenge der natürlichen Zahlen. Demzufolge bestehen die Graphen dieser Funktionen natürlich nur aus einzelnen Punkten. Durch diese Punkte ist trotzdem oft ein Kurvenzug gelegt worden. Diese Kurvenzüge stellen praktisch freihändig gezeichnete Regressionsfunktionen dar, bei denen auf die Berechnung der Regressionskoeffizienten zumeist verzichtet wurde. In den Abb. 5.23 bis 5.28 besteht der Definitionsbereich aus der Menge der vorgegebenen Mittelwerte der Poissonverteilungen. Hier kann man die dargestellten Graphen ebenfalls als Regressionsfunktionen auffassen. Die unterstellten Mittelwerte sind als Stichprobenwerte aufzufassen, wobei μ als stetige Variable zu interpretieren ist.

Abb. und Tab. kann man klar die Einteilung des Gebäudes in verschiedene Zonen ablesen. In den Tab. sind die Zonen durch waagerechte Linien getrennt. Die Pfeile bedeuten, daß das betreffende Tabellenfach denselben Wert aufweist wie das benachbarte Fach.
Innerhalb einer Zone sind die Wartezeiten unabhängig von der Zieletage, zwischen den Zonen bestehen aber große Unterschiede.
Betrachten wir einmal näher Abb. 5.13. Bei n=2 Aufzügen sind die Wartezeiten für Zone 1 sehr hoch, für Zone 2 bedeutend niedriger. Bei n=3 nimmt die durchschnittliche Wartezeit pro Zone langsam zu. Bei n=4 sind die Wartezeiten in der Zone 1 identisch mit den Wartezeiten bei n=3. Das liegt daran, daß die Zonen identisch sind und die Simulation bei allen Simulationsläufen mit identisch wiederholbaren Pseudozufallszahlen abläuft. In Zone 2 sind die Wartezeiten niedriger als in Zone 1 , in Zone 3 und 4 steigen sie dann an. Bei n=5 Aufzügen ist die Zoneneinteilung völlig anders als bei 4 Aufzügen. Die durchschnittlichen Zonenwartezeiten steigen bis Zone 4 an, in Zone 5, die nur das 10. Stockwerk umfasst,ist die Wartezeit dann wieder niedriger. Bei sechs Aufzügen sind gegenüber n=5 die ersten drei und die letzte Zone identisch, nur die 4. Zone ist in zwei Zonen aufgeteilt worden - je ein Stockwerk. Entsprechend ergeben sich für diese beiden Etagen niedrigere Wartezeiten als bei n=5.
Ein ähnliches Bild zeigt sich auch in Abb. 5.2. Nur bei zwei Aufzügen besteht ein signifikanter Unterschied zu Abb. 5.13: die Wartezeiten der 1. und 2. Zone sind in Abb. 5.2 kaum zu unterscheiden. Dies dürfte wohl so zu interpretieren sein: bei der höheren Ankunftsintensität in Modell 2, das ja die eigentliche kurze Verkehrsspitze beschreibt, ist die Aufzugsanlage bei nur zwei Aufzügen offenbar an ihrer Kapazitätsgrenze. Besonders der Bedarf in Zone 1 kann nur bei sehr langen Wartezeiten gedeckt werden - Abb. 5.13.
Die Zonenunterschiede hinsichtlich der Belastung der Aufzüge kommen bei der niedrigen Ankunftsintensität des Modells 1

gar nicht zum Ausdruck - Abb. 5.2.
Allgemein zeigt sich beim Vergleich der Modelle 1 bis 4, daß die Wartezeiten mit zunehmender Ankunftsintensität , ähnlich wie bei der Normalsteuerung, zunehmen.
Die Tendenz der gesamten durchschnittlichen Wartezeiten bei Variation der Zahl der Aufzüge zeigen auch hier die 10. Zeilen der obigen Tabellen bzw. Abb. 5.8 und 5.19.
Auch hier nehmen wie bei der Normalsteuerung die durchschnittlichen Wartezeiten mit steigender Zahl der eingesetzten Aufzüge degressiv ab.
Ein Vergleich von Zonensteuerung und Normalsteuerung zeigt hinsichtlich der Wartezeit für die vier betrachteten Modelle unterschiedliche Ergebnisse:
Bei beiden Steuerungen nehmen mit steigender Ankunftsintensität die durchschnittlichen Wartezeiten zu. Die Normalsteuerung kann aber den Verkehr bei Modell 2 und 3 mit zwei Aufzügen nicht mehr bewältigen. Dies ist ein Indiz dafür, daß bei hoher Belastung der Aufzugsanlage die Zonensteuerung bessere Ergebnisse liefert als die Normalsteuerung.
Eine Variation der Belastung kann vorgenommen werden, indem die Zahl der Aufzüge konstant gehalten wird und die Ankunftsintensität variiert wird - im obigen Beispiel n=2 Aufzüge, die Ankunftsintensität steigt in den Modellen von Modell 1, 4, 3 bis zu Modell 2 - oder indem man die Ankunftsintensität festhält und die Zahl der Aufzüge variiert. Die Ergebnisse der zweiten Methode sind für Modell 1 und Modell 2 in den Abb. 5.9 und 5.20 dargestellt.
In Modell 1 - niedrige Ankunftsintensität - liegen die Wartezeiten bei Normalsteuerung in allen Fällen unterhalb der Wartezeiten bei Zonensteuerung. Mit wachsender Belastung - Verringerung der Zahl der Aufzüge - verringert sich der Abstand aber immer mehr. Hieraus lässt sich schon eine Schlußfolgerung ziehen: Bei der geringen beobachteten Ankunftsintensität ist die Normalsteuerung hinsichtlich der Wartezeiten der Zonensteuerung überlegen. Es läßt sich aber

erkennen, daß mit steigender Belastung diese Überlegenheit abnimmt.
In Modell 4 ist die Zonensteuerung bei n=2 Aufzügen schon besser als die Normalsteuerung - siehe Tab. 5.19 und 5.20, ab Modell 3 sind zwei Aufzüge bei der Normalsteuerung zuwenig. In allen Modellen ist ab drei Aufzügen die Normalsteuerung jedoch der Zonensteuerung überlegen.
Zusammenfassend lässt sich sagen, daß sich schon die Tendenz erkennen lässt, daß bei niedriger Belastung die Normalsteuerung und bei höherer Belastung die Zonensteuerung hinsichtlich der Wartezeit besser sein wird. Genauer kann man dies aber erst bei den Modellen des Typs III und IV feststellen.
Stellt man sich die Frage, welche Steuerung und welche Anlagengröße für das der Simulation zugrundeliegende Gebäude zu wählen sei, und legt man als Kriterium fest, daß die durchschnittliche Wartezeit während der Aufspitze einen bestimmten Wert, sagen wir 30 sec, nicht überschreiten soll, so ist nach diesem Kriterium ein Aufzugssystem von vier Aufzügen zu wählen, das mithilfe der Normalsteuerung zu steuern ist. Hierbei wird natürlich von den anderen gegebenen Werten der Aufzugsanlage ausgegangen.
Zur Wahl des Kriteriums:
In der Literatur wird generell ohne Begründung von Erfahrungswerten ausgegangen. H.B.Cook[1], F.A.Annett[2] und R.S.Phillips[3] wählen als Kriterium die durchschnittliche Verweildauer eines Benutzers im System. Für die Berechnung dieser Größe

---

[1] H.B.Cook, A measuring stick for elevator service. In: Power, New York 1931, S.556

[2] F.A.Annett, S.482

[3] R.S.Phillips, Electric lifts.5. Aufl. London 1966, S.13

begnügen sie sich mit unbrauchbaren groben Faustregeln. Bei Cook gilt die Bedienung als "excellent", wenn die Verweilzeit 45 sec nicht überschreitet, ist sie geringer als 52,5 sec, bezeichnet er die Bedienung als "good", "fair" ist sie bis zu 60 sec. Die anderen Autoren machen keine Angaben über absolute Werte. In der übrigen Literatur wird nur von den Wartezeiten als Kriterium ausgegangen. So schreibt P. Gräbner[1]: "Als Erfahrungswerte gelten: Die Wartezeit soll beim Füllen 30 ... 40 sec betragen.." .G.Hahn[2] über die in den USA üblichen Berechnungsmethoden: "Eine zusätzliche Vorschrift begrenzt in vielen Fällen die Wartezeit an jedem Aufzug auf nur 30 bis höchtens 60 sec". W.Müller[3] schreibt, daß als qualitativer Faktor an eine Aufzugsanlage die Bedingung gestellt wird, daß die durchschnittliche Wartezeit etwa 20 -30 sec betragen soll. Problematisch ist hierbei die Definition der Wartezeit. Alle Autoren gehen davon aus, daß die Aufzüge beim Füllen vollkommen gleichmäßig in denselben Abständen fahren. Als durchschnittliche Wartezeit definieren sie dann den halben zeitlichen Abstand zwischen zwei Abfahrten, die deutschen Autoren wählen den ganzen Abstand.

Im folgenden sollen die Reisezeiten betrachtet werden: Zunächst zu den Abb.5.3 und 5.14, die die Reisezeiten pro Stockwerk für Modell 1 und 2 bei Normalsteuerung darstellen, sowie zu den Tab. 5.3, 5.9, 5.15 und 5.21.
Die Tabellen und besonders die Schaubilder zeigen bei vorgegebener Aufzugszahl eine lineare Abhängigkeit der durchschnittlichen Reisezeit von der Zieletage.

---

[1] Peter Gräbner, S.170
[2] G.Hahn, S.16
[3] Werner Müller, Die Ermittlung ..., S.444

Eine lineare Regressionsanalyse ergibt bei Modell 2 für n=3 Aufzüge die Regressionsfunktion

$$R(I) = -9{,}204 + 10{,}705\ I \qquad \text{und}$$
$$r = 0{,}9997 \ .$$

Für 6 Aufzüge ergibt sich:

$$R(I) = -1{,}149 + 6{,}4965\ I \qquad \text{und}$$
$$r = 0{,}9987 \ .$$

Die durchschnittliche Reisezeit für Stockwerk k setzt sich zusammen aus der Fahrzeit des Aufzuges und den Zeiten, die auf Zwischenhalte zurückzuführen sind. Wie wir anfangs gesehen haben, sind nun die reinen Fahrzeiten linear abhängig von der zurückgelegten Fahrstrecke - 2.1.
Bei einer Fahrt zum k. Stockwerk habe der Aufzug n Zwischenaufenthalte. Die Teilfahrstrecken seien a_i. Es gilt dann: $\sum_{i=1}^{n+1} a_i = k$. Die Fahrzeit für eine Teilfahrt nach 2.1 :

$$t_i = 8{,}062 + 1{,}8\ a_i \ .$$

Die Gesamtfahrzeit nach k :

$$T = \sum_{i=1}^{n+1} t_i = 8{,}062(n+1) + 1{,}8\ k \ . \qquad - 5.1 -$$

Die Gesamtfahrzeit ist also eine Funktion von Zielstockwerk und von der Zahl der Zwischenhalte. Die Zahl der Zwischenhalte ist nun wiederum von der Zielverteilung - z.B. Tab. 3.10 - sowie von k abhängig. Wie sich aus 5.1 ergibt, hat dagegen die Verteilung der Zwischenhalte auf die Stockwerke keinen Einfluß auf die Gesamtfahrzeit. Stellt man auf die durchschnittliche Reisezeit nach k ab, ist in 5.1 n durch E(n) zu ersetzen.
Nur wenn E(n) eine lineare Funktion von k ist, ist auch T linear von k abhängig. Wird in 5.1 für n a+bk eingesetzt, ergibt sich nämlich :

$$T = 8{,}062 + 8{,}062a + (1{,}8+b)k \ .$$

Wird nun unterstellt, daß die Zielverteilung gleichverteilt sei, ergibt sich für die erwartete Zahl von Zwischenhalten

folgendes:
θ_i sei die Wahrscheinlichkeit für einen Halt in i
N = Anzahl Zielstockwerke im Gebäude
P = durchschnittliche Zahl Einsteiger pro Fahrt
Es gilt dann:

$$\bar{\theta}_i = \left(\frac{N-1}{N}\right)^P \quad \text{, daraus folgt} \quad \theta_i = 1 - \left(\frac{N-1}{N}\right)^P$$

θ_i ist also unabhängig von i. Nach der Binomialverteilung ist dann der Erwartungswert für die Zahl der Zwischenhalte:

$$E(n) = (k-1)\left[1 - \left(\frac{N-1}{N}\right)^P\right] = k - 1 - (k-1)\left(\frac{N-1}{N}\right)^P \qquad -5.2-$$

Der Erwartungswert ist also eine lineare Funktion von k.
Nach kurzer Umformung ergibt sich für T:

$$T = 8{,}062(1-\theta) + k(8{,}062\,\theta + 1{,}8) \qquad -5.3-$$

Die Bestimmung der wahrscheinlichen Anzahl Halte bei einem Umlauf eines Aufzuges ist schon sehr früh in der Literatur behandelt worden.
F.A.Annett[1] verweist auf einen gewissen S.G.Margles , der 1922 die Formel

$$\text{probable stops} = S - (S-1)\left(\frac{S-1}{S}\right)^P \qquad -5.4-$$

entwickelt habe. Dabei ist Gleichverteilung der Ziele unterstellt , das S entspricht N in 5.2 . Weiter ist angenommen,daß der Aufzug auf jeden Fall im obersten Stockwerk hält. Man kann sich 5.4 aus 5.2 entstanden denken, indem man die Zahl der Zwischenhalte bis zum obersten Stockwerk S berechnet und dann noch eine 1 für das sichere Ereignis "Halt in S" addiert.
Auf eine Begründung verzichtet Annett, dem Verweis auf Margles ist wegen fehlender Angaben nicht nachzugehen.
Auch H.B.Cook[2] verweist auf diese Formel.

[1] F.A.Annett, S. 466

[2] H.B.Cook, Selecting elevators ..., S.404

Dieser Aufsatz Cooks weist durchweg wörtliche Übereinstimmung mit der betreffenden Passage bei Annett auf. Basset Jones[1] entwickelt ebenfalls wie Margles dieselbe Formel im Jahre 1923. Später erweitert er diesen Ansatz für nicht gleichverteilte Ziele[2]. Er verweist dabei ohne Angabe der Literaturstelle auf einen David Lindquist, der eine entsprechende Formel als erster entwickelt habe. Phillips[3] entwickelt entsprechende Ansätze auf die gleiche Art neu, ohne dabei auf die alten Autoren zurückzugehen - in seiner Bibliographie sind sie allerdings aufgeführt.

Bei nicht gleichverteilter Zielverteilung ergibt sich folgendes:

$$E(n) = E(x_1 + x_2 + \ldots + x_{k-1}) = E(x_1) + E(x_2) + \ldots + E(x_{k-1}) ,$$

dabei ist x_i die Zahl von Halten in Etage i bei einem Umlauf.

$$E(n) = \sum_{i=1}^{k-1} \theta_i = \sum_{i=1}^{k-1} (1 - \bar{\theta}_i) = k - 1 - \sum_{i=1}^{k-1} \bar{\theta}_i \quad . \qquad -5.5-$$

Die $\bar{\theta}_i$ ergeben sich aus der Zielverteilung - bei uns etwa aus Tab. 3.10 - nach:

$$\bar{\theta}_i = (1 - f_i)^P \quad . \qquad -5.6-$$

In 5.5 eingesetzt:

$$E(n) = k - 1 - \sum_{i=1}^{k-1} (1 - f_i)^P \qquad \text{für } k = 2,N$$

$$E(n) = 0 \qquad \text{für } k = 1 .$$

Die durchschnittliche Belastung einer Kabine hängt u.a. von der Zahl der Aufzüge und der Ankunftsintensität ab. Wählen

---

[1] Basset Jones, The probable number of stops made by an elevator. In: General electric review, Schenectady 1923, S.583-587

[2] ders.: Note on the probable number of stops made by an elevator. In: Gen. el. review, 1926, S.425-426

[3] R.S.Phillips, S.14 ff

wir als einen Durchschnittswert P = 10,so erhalten wir bei Zugrundelegen der empirischen Zielverteilung folgende Tabelle - Tab. 5.33 - für die Erwartungswerte der Zahl der Zwischenhalte in Abhängigkeit von k.
Eine lineare Regressionsanalyse ergibt die Kleinste- Quadrate-Regressionsfunktion

$$E(n) = -1{,}54 + 0{,}71\,k \quad \text{mit } \underline{r = 0{,}9995} \ .$$

Obwohl die Ziele nicht gleichverteilt sind, zeigt sich doch eine sehr starke lineare Abhängigkeit der Zahl der Zwischenhalte von der Zieletage.

Tab. 5.33 : Anzahl Zwischenstops in Abhängigkeit von der Zieletage bei empirischer Zielverteilung

Zieletage k	$1 - f_k$	$\bar{\Theta}_k = (1 - f_k)^{10}$	$\sum_{i=1}^{k-1} (1 - f_i)^{10}$	$k-1-\sum_{i=1}^{k-1}(1-f_i)^{10} = E(n)$
1	1	1	.	.
2	0,929261	0,48015017	1	0
3	0,891304	0,31641606	1,48015017	0,51984983
4	0,8408105	0,17659614	1,79656623	1,20343377
5	0,8818387	0,28437507	1,97316237	2,02683763
6	0,8933266	0,32367012	2,25753744	2,74246256
7	0,8654274	0,23567112	2,58120756	3,41879244
8	0,8966089	0,33576112	2,81687868	4,18312132
9	0,8752742	0,26390052	3,15263980	4,84736020
10	0,9261492	0,46431061	3,41654032	5,58345969

Bis jetzt haben wir die Gesamtfahrzeit T als Einflußfaktor der Gesamtreisezeit betrachtet. Neben T ist jedoch auch die Gesamthaltezeit für die Reisezeit entscheidend.
Die Haltezeiten an den einzelnen Stops sind wieder linear über die Ausstiegszeitformel von der Zielverteilung abhängig. Es zeigt sich also, daß theoretisch nur bei einer Gleichverteilung der Ziele die Reisezeiten linear von der

Stockwerkszahl abhängen. Anscheinend hat jedoch die empirische Zielverteilung der Modelle des Typs I keinen sehr störenden Einfluß auf die durchschnittlichen Reisezeiten, wie besonders die Regressionsanalyse bezüglich der Zahl von Zwischenaufenthalten zeigt.

Untersucht man bei der Normalsteuerung die Reisezeiten pro Stockwerk bei unterschiedlicher Belastung, erkennt man, daß die Reisezeiten mit zunehmender Belastung - Verringerung der Zahl der Aufzüge- schwach progressiv ansteigen - vgl. Abb. 5.3 und 5.14; man halte eine Etagenzahl fest. Dies macht sich besonders in den höheren Etagen bemerkbar. Für die totalen Reisezeiten gilt dasselbe, vgl. Abb. 5.7 und 5.18. In 5.18 könnte allerdings auch sicher ein linearer Verlauf angenommen werden.
Ein Vergleich mit den Wartezeiten zeigt, daß die durchschnittlichen totalen Reisezeiten in allen vier Modellen größer sind als die entsprechenden Wartezeiten.

Bei der Zonensteuerung haben die Reisezeiten einen gänzlich anderen Verlauf- Tab. 5.4,5.10, 5.16 und 5.22 sowie die Abb. 5.4 und 5.15.
Die Abbildungen zeigen sehr deutlich die den Verlauf kennzeichnende "Zickzackkurve", die durch die Zoneneinteilung zustande kommt.
Die Reisezeiten innerhalb einer Zone steigen linear an, die Reisezeiten der folgenden Zone beginnen wieder auf einem niedrigeren Niveau. Nehmen wir etwa n=3 Aufzüge in Modell 1 und 2 heraus. Jede Zone besteht aus drei Etagen; die Reisezeiten zu den untersten Etagen einer jeden Zone liegen auf einer Geraden; bei diesen Stockwerken beginnen parallele Geraden, die die Reisezeiten innerhalb der Zonen kennzeichnen.
Dieses Bild kommt dadurch zustande, daß die Aufzüge non-stop zu den untersten Stockwerken einer Zone fahren. Für diese Fahrzeiten gilt die Fahrzeitformel 2.1, hinzu kommen die

durchschnittlichen Ausstiegszeiten, die von der Zielverteilung abhängen. Innerhalb einer Zone gelten dann die Überlegungen, die auch schon bei der Normalsteuerung angestellt wurden. Pro Aufzugszahl sind diese Geraden in etwa parallel, mit steigender Aufzugszahl werden sie immer flacher.
Vergleicht man Warte- und Reisezeiten bei der Zonensteuerung, so zeigt die Abb. 5.19, daß in Modell 2 die totale durchschnittliche Reisezeit generell niedriger ist als die durchschnittliche Wartezeit, dies umso stärker, je größer die Belastung - je kleiner die Zahl der Aufzüge ist. Entsprechend zeigt sich für Modell 1 - Abb. 5.8 , daß bei bis zu 4 Aufzügen die durchschnittliche Reisezeit niedriger ist als die durchschnittliche Wartezeit, bei 5 und 6 Aufzügen ist sie etwas höher als die Wartezeit.
Es zeigt sich mit wachsender Belastung ein progressiver Verlauf der Reisezeiten, der stärker ist als bei der Normalsteuerung. Erhöht man also bei der Zonensteuerung die Zahl der Aufzüge wesentlich, hat dies kaum einen Effekt auf die durchschnittlichen Reisezeiten, wenn man sich im Bereich niedriger Belastung befindet. Im Bereich hoher Belastung ist die Einsparung an Reisezeit jedoch beträchtlich.
Ein Vergleich der totalen durchschnittlichen Reisezeiten bei Zonen- und Normalsteuerung zeigt bei allen betrachteten Modellen und Aufzugssystemen einen eindeutigen Unterschied zugunsten der Zonensteuerung, vgl. Abb. 5.10 und 5.21 für Modell 1 und 2. Die Unterschiede sind umso größer, je geringer die Zahl der Aufzüge ist bzw. je größer die Ankunftsintensität ist. So steigen die Differenzen von Modell 1 über 4, 3 bis zu Modell 2 von 11,65 sec über 14,92, 18,35 bis zu 20,29 sec an.
Nun zu den Verweilzeiten, zunächst bei Normalsteuerung:
Bei der Normalsteuerung zeigen die durchschnittlichen Ver-

weilzeiten in Abhängigkeit von der Zieletage einen eindeutig linearen Verlauf - vgl. Abb. 5.5 und 5.16. Eine lineare Regressionsanalyse ergibt bei Modell 2 für n=3 Aufzüge die Regressionsfunktion

$$V(I) = 31{,}1812 + 10{,}4509\ I \quad \text{und} \quad r = 0{,}9991\ .$$

Für n=6 Aufzüge ergibt sich:

$$V(I) = 9{,}3969 + 6{,}5481\ I \quad \text{und} \quad r = 0{,}9982\ .$$

Dies Ergebnis ist nicht anders zu erwarten, da die durchschnittlichen Wartezeiten unabhängig von der Stockwerkszahl sind, die Reisezeiten linear von ihr abhängen und die Verweilzeiten sich aus der Addition dieser Größen ergeben.

Bei konstanter Zieletage und Variation der Zahl der Aufzüge ergibt sich mit steigender Aufzugszahl ein degressiver Abfall der Verweilzeiten - vgl. die obigen Abbildungen. Dies zeigt sich ebenfalls für die totalen durchschnittlichen Verweilzeiten bei Erhöhung der Zahl der eingesetzten Aufzüge - Abb. 5.7 und 5.18.

Bei der Zonensteuerung zeigen die Verweilzeiten wie die Reisezeiten einen typischen "Zickzack"-Verlauf, vgl. Abb. 5.6 und 5.17. Der Verlauf unterscheidet sich aber doch deutlich von dem der Reisezeiten.
Bei den Reisezeiten liegen, wie schon erwähnt, die Zeiten bei vorgegebener Aufzugszahl für jede Zone auf einer Geraden, diese Geraden verlaufen zueinander parallel und ihre Anfangspunkte lassen sich wiederum linear verbinden. Der Verlauf der Verweilzeiten ist auch durch eine Schar paralleler Geraden gekennzeichnet. Die Anfangspunkte liegen aber nicht auf einer Geraden, sie werden vielmehr durch die durchschnittlichen Wartezeiten, die ja von der Zone abhängen, mitbestimmt.
Wie bei den Warte- und Reisezeiten ergibt sich auch bei den Verweilzeiten, wenn man die Zahl der Aufzüge variiert, das Bild, daß sich, vergleicht man etwa n=5 mit n=6, für die ersten drei Zonen und für die letzte Zone dieselben Verweil-

zeiten ergeben. Dies liegt, wie schon gesagt, an der identischen Wiederholbarkeit der Pseudozufallszahlen und daran, daß die entsprechenden Zonen übereinstimmen.
Die totalen durchschnittlichen Verweilzeiten zeigen bei Erhöhung der Aufzugszahl wieder einen degressiven Verlauf, der aber viel stärker ist als bei Vorliegen der Normalsteuerung - Abb. 5.8 und 5.19 .
Ein Vergleich von Zonen- und Normalsteuerung hinsichtlich der Verweilzeiten zeigt folgendes:
In Modell 2 liegen die totalen durchschnittlichen Verweilzeiten bei der Zonensteuerung bis zu fünf Aufzügen unterhalb derjeniger bei Normalsteuerung. Nur bei sechs Aufzügen ist die Normalsteuerung etwas besser - Abb. 5.22 .
In Modell 1 - Abb. 5.11 - ist die Normalsteuerung schon bei vier Aufzügen überlegen, wobei der Unterschied bei n=4 sicher nicht signifikant ist.
Suchen wir für das der Simulation zugrundeliegende Gebäude eine optimale Aufzugsanlage - bei unseren vorgegebenen Daten für Geschwindigkeit und Kapazität eines Aufzuges, so müssen wir einen Sollwert für die durchschnittliche Verweilzeit vorgeben, sagen wir 60 sec. Unter Zugrundelegung dieses Kriteriums sind vier Aufzüge zu wählen, die mithilfe der Zonensteuerung zu steuern sind. Dabei ergibt sich eine totale durchschnittliche Wartezeit von 32,85 sec und eine totale durchschnittliche Reisezeit von 27,48 sec , vgl. Tab. 5.8 und 5.10. Bei der Wahl der durchschnittlichen Wartezeiten als Kriterium hatten wir ebenfalls vier Aufzüge zu wählen, die aber mithilfe der Normalsteuerung zu steuern waren. Dabei würde sich eine totale durchschnittliche Verweilzeit von 70,63 sec ergeben, vgl. Tab. 5.11.
Welche Steuerung zu nehmen ist, hängt in diesem Beispiel vom Optimalkriterium ab. Die Verweilzeit ist der Wartezeit bei der Wahl dieses Kriteriums vorzuziehen, da während der gesamten Verweildauer volks- und betriebswirtschaftliche Kosten anfallen.

5.2.2 Modell des Typs II

Wie schon erwähnt, liegt diesem Typ statt der empirischen Ankunftsverteilung des Modells 2 eine theoretische Ankunftsverteilung zugrunde, eine Poissonverteilung mit $\varrho = 5{,}247813$; dies entspricht genau dem durchschnittlichen Ankunftsintervall des Modells 2.
Es zeigt sich, daß bei der Normalsteuerung das Modell mit der theoretischen Ankunftsverteilung ein sehr viel besseres Ergebnis liefert als das Modell mit der empirischen Verteilung - vgl. hierzu Tab. 5.25 mit den Tab. 5.7, 5.9 und 5.11. So ergibt sich bei Typ II eine durchschnittliche totale Wartezeit von nur 28,42 sec gegenüber 38,76 sec bei Typ I, das Verhältnis bei den Reisezeiten ist 49,69 zu 54,88 sec, bei den Verweilzeiten ergibt sich demnach 78,11 zu 93,64 sec.
Auch bei der Zonensteuerung ist ein Unterschied zugunsten der theoretischen Ankunftsverteilung festzustellen, der allerdings sehr viel geringer ist als bei der Normalsteuerung - vgl. hierzu Tab. 5.26 mit den Tab. 5.8, 5.10 und 5.12. Die totalen durchschnittlichen Wartezeiten sind dabei 36,76 bzw. 40,13 sec, die Reisezeiten 30,29 bzw. 32,14 sec und die Verweilzeiten 67,07 bzw. 72,27 sec.
Die empirischen Ankunftsverteilungen der Modelle 1 bis 4 sind dadurch gekennzeichnet, daß die Varianz jeweils größer ist als der Mittelwert- bei Modell 2 $\bar{x} = 2{,}85$, $\sigma_x^2 = 3{,}37$. Hierdurch entsteht eine stärkere Streuung der Belastung der Aufzugsanlage als bei poissonverteilten Ankünften. Offensichtlich wird die Zonensteuerung relativ besser mit diesen Unregelmäßigkeiten der Belastung fertig als die Normalsteuerung, die darauf viel empfindlicher reagiert. So ist bei der empirischen Ankunftsverteilung die Normalsteuerung hinsichtlich der Verweilzeiten um 21,37 sec schlechter als die Zonensteuerung, bei der theoretischen jedoch nur um 11,04 sec.

5.2.3 Modelle des Typs III

Die Tabellen 5.27 bis 5.29 und die Abb. 5.23 bis 5.25 geben eine Zusammenfassung der Ergebnisse für die Modelle des Typs III, die im Gegensatz zu Typ I von Poissonverteilungen als Ankunftsverteilungen ausgehen. Alle anderen Parameter, wie auch die Zielverteilung, sind geblieben.
Welchen Sinn haben diese Modelle?
Mithilfe der Poissonverteilungen können unterschiedliche Belastungszustände besser simuliert werden als dies mit empirischen Verteilungen möglich ist. Auch wird von den speziellen für dieses eine Gebäude typischen Ankunftsverteilungen zugunsten allgemeinerer abgegangen.
Ist ein Vergleich zu den empirischen Modellen möglich?
Hierzu wurde das Modell vom Typ 2 gebildet. Der Vergleich zeigte, daß die Normalsteuerung bei Vorliegen einer Poissonverteilung sehr viel besser abschneidet als bei einer empirischen Ankunftsverteilung, die Zonensteuerung jedoch nur unwesentlich. Dieses Ergebnis ist sehr wichtig für die Interpretation der theoretischen Modelle: Sollte sich bei hoher Belastung, wie zu erwarten ist, ein Vorteil der Zonensteuerung herausstellen, kann er nicht mit dem Argument entkräftet werden, daß daran die Poissonverteilung schuld sei, denn diese bevorzugt ja die Normalsteuerung - zumindest im Gegensatz zu den vorliegenden empirischen Ankunftsverteilungen.

Nun zu den Ergebnissen:
Bis $\mu = 8$ sind die Systeme stabil, wie die Varianzen der Blockmittelwerte für Reise-, Warte- und Verweilzeiten zeigen - in den Tabellen bedeutet Varianz die Varianz der Blockmittelwerte. Bei $\mu = 9$ ist bei Normalsteuerung die Warteschlange zu groß geworden - bei mehr als 300 Wartenden stoppt die Simulation automatisch. Bei der Zonensteuerung lassen sich zwar noch Mittelwerte für Warte- und Reisezeiten ermitteln, wie die Varianzen zeigen, ist eine Interpretation der

Warte- und Verweilzeiten wegen der starken Autokorrelation der Blockmittelwerte ab $\mu = 9$ nicht mehr gut möglich. Nur die Reisezeiten sind natürlich noch interpretierbar, sie nähern sich einem Grenzwert für vollste Belastung an.

Zunächst zu den Wartezeiten:

Abb. 5.23 zeigt deutlich den nichtlinearen Verlauf der durchschnittlichen Wartezeiten bei wachsendem μ.

Bei der Zonensteuerung ist der Verlauf zunächst leicht degressiv, bei ungefähr $\mu = 5$ liegt der Wendepunkt, danach verläuft der Graph progressiv.

Bei der Normalsteuerung liegen die Wartezeiten bis $\mu = 8$ unterhalb der Wartezeiten bei Zonensteuerung, erst ab $\mu = 8{,}5$ zeigt sich die Zonensteuerung überlegen. Der Verlauf der Wartezeiten bei Normalsteuerung ist konvex.

Die Reisezeiten bei Normalsteuerung zeigen einen zunächst konvexen, ab $\mu = 2{,}5$ etwa konkaven Verlauf. Sie liegen alle oberhalb der Werte der Zonensteuerung, die einen linearen Verlauf mit sehr geringer Steigung haben. Der Abstand der entsprechenden Werte vergrößert sich mit zunehmender Verkehrsintensität - vgl. Abb. 5.24.

Die Verweilzeiten bei Zonensteuerung verlaufen zunächst degressiv, ab etwa $\mu = 4{,}5$ progressiv. Wenn sich die Verweilzeiten als Kosten - volkswirtschaftlich gesehen- interpretieren lassen, so ergibt sich ein typischer Kostenverlauf, der einer ertragsgesetzlichen Produktionsfunktion entspricht. Die Ankunftsintensität darf hierbei als Ertrag - Indiz für die Beförderungsmenge - gewertet werden.

Bei der Normalsteuerung sind zwei Wendepunkte zu beobachten, die Kurve verläuft bis $\mu = 3{,}5$ progressiv, degressiv bis $\mu = 6{,}5$, danach folgt wieder ein progressiver Anstieg. Dieser Verlauf kommt dadurch zustande, daß im Bereich geringer Ankunftsintensitäten sowohl Warte- als auch Reisezeiten progressiv ansteigen, im mittleren Bereich die Reisezeiten degressiv und die Wartezeiten linear, im oberen Bereich die Wartezeiten stark progressiv ansteigen, während der Verlauf der Reisezeiten sehr schwach degressiv ist.

Ein Vergleich von Zonen- und Normalsteuerung zeigt, daß die Zonensteuerung ab $\mu = 4$ der Normalsteuerung überlegen ist. Die Unterschiede nehmen mit wachsendem μ immer stärker zu - Abb. 5.25 .

5.2.4 Modelle des Typs IV

Es soll hier untersucht werden, wie sich Zonen- und Normalsteuerung verhalten, wenn man von theoretischen Ankunftsverteilungen ausgeht und die Ziele gleichverteilt sind.
An den Abb. 5.26, 5.27 und 5.28 lässt sich tendenziell ein ähnlicher Verlauf ablesen wie bei den Modellen des Typs III.
Bei den Wartezeiten ist die Normalsteuerung bis $\mu = 7$ überlegen. Ein Vergleich mit den Wartezeiten bei Typ III ist interessant: Im unteren Intensitätsbereich sind die Unterschiede minimal, erst ab $\mu = 7{,}5$ machen sie sich stärker bemerkbar.
Auch die Zonensteuerung reagiert hinsichtlich der Wartezeiten auf die Gleichverteilung positiv. Die Belastbarkeit schiebt sich von $\mu = 8$ bis auf $\mu = 11{,}5$ hinaus. Dadurch ergibt sich ein sehr großer Vorsprung für die Zonensteuerung, da die Wartezeiten bis $\mu = 10{,}5$ noch fast linear ansteigen, während die Normalsteuerung gar nicht mehr arbeitet. Ab $\mu = 11{,}5$ wird das System instabil, wie man auch an den Varianzen der Verweilzeiten leicht erkennt.
Bei den Reisezeiten ergibt sich im Vergleich zu Typ III nur ein minimaler Unterschied, der vielleicht höchstens bei der Normalsteuerung bei sehr hoher Belastung signifikant ist.
Bei den Verweilzeiten ergibt sich, daß genau wie bei Typ III die Zonensteuerung ab $\mu = 4$ überlegen ist. Diese Überlegenheit zeigt sich durch die viel größere Belastbarkeit der

Aufzugsanlage bei hoher Ankunftintensität. Die Anlage von sechs Aufzügen verkraftet bis zu durchschnittlich 11,5 Benutzer pro 15 sec bei einer durchschnittlichen Verweilzeit von 83,29 sec, während die Anlage bei Normalsteuerung bei Vorgabe dieser Verweilzeit nur durchschnittlich ca. 6,8 Benutzer befördern kann.

6 Schlußbetrachtung

Zusammenfassend lässt sich folgendes sagen:
Bei den empirischen Modellen des Typs I ist die Normalsteuerung der Zonensteuerung im niedrigen Belastungsbereich - bei vielen Aufzügen - überlegen, während die Zonensteuerung nur an der Belastungsgrenze - bei zwei Aufzügen - mehr leisten kann.
Ein Vergleich eines Modelles mit einer Poissonverteilung als Ankunftsverteilung mit einem Modell des Typs I ergibt bei gleicher Ankunftsintensität, daß bei der Poissonverteilung beide Steuerungsarten zu niedrigeren Verweilzeiten führen als bei der empirischen Ankunftsverteilung. Dies liegt wohl daran, daß die Varianz der empirischen Verteilung größer, also die Belastung der Aufzugsanlage ungleichmäßiger ist. Bei der Poissonverteilung gewinnt besonders die Normalsteuerung. Dies zeigt, daß die Zonensteuerung auch mit der ungünstigeren Ankunftsverteilung einigermaßen zurechtgekommen ist.

Die Modelle des Typs III, bei denen bei vorgegebener Zahl von sechs Aufzügen die Ankunftsintensität variiert wird, ergeben bei einer hohen Belastung eine eindeutige Überlegenheit der Zonensteuerung.
Diese Überlegenheit zeigt sich noch stärker bei den Modellen des Typs IV, die durch eine Gleichverteilung der Ziele gekennzeichnet sind. Diese Gleichverteilung beeinflußt auch beide Steuerungsarten positiv, besonders aber die Zonensteuerung.
Hierdurch zeigt sich, daß die vorgenommene Zonenaufteilung die auf die empirische Zielverteilung kaum Rücksicht nimmt, bei den Modellen der Typen I, II und III nicht sehr glücklich ist. Es wäre zu untersuchen, welche Zonenaufteilung bei diesen Modellen oder auch ganz allgemein bei gegebener Aufzugsanlage und Zielverteilung optimal ist. Wie im Anfangskapitel schon gesagt, kann man dieses Problem aber wohl nur durch heuristische Verfahren lösen.

LITERATURVERZEICHNIS

ANNETT,F.A., Electric Elevators - Their Design, Construction, Operation and Maintenance. 2.nd Edition, New York,London 1935.

COOK, HOWARD B., A measuring stick for elevator service. In: Power, 1931, S. 556.

COOK, HOWARD B., Selecting elevators for an office building. In: Power, 1932, S. 404-408.

EMSHOFF,JAMES R. und SISSON ROGER L., Design and use of computer simulation models, New York 1970.

GRÄBNER, PETER, Zur Ermittlung der Förderleistung bei Personenaufzügen. In: Hebezeuge und Fördermittel, 1. Jg. 1961, S. 167-172.

HAHN, G., Berechnung der Förderleistung von Personenaufzügen. In: Fördern und Heben, 4. Jg. 1954, S. 16-18.

HART, B.I., Significance levels for the ratio of the mean square successive difference to the variance. In: The Annals of Mathematical Statistics, Volume 13 1942, S. 445-447.

INUZUKA, ISAO und OCHI, TOSHIO, Transportation capacity of elevators for multistoried buildings - Effect of express service for divided floors in the up-peak pattern. In: Hitachi Review, Volume 15 1966, S. 178-186.

JONES, BASSETT, The probable number of stops made by an elevator. In: General electric review, Volume 26 1923, S. 583-587.

JONES, BASSETT, Note on the probable number of stops made by an elevator. In: General electric review, Volume 29 1926, S. 425-426.

MÜLLER, WERNER, Die Ermittlung der erforderlichen Anzahl und Größe von Aufzügen. In: Deutsche Architektur, 7. Jg. 1966, S. 442-444.

MÜLLER, WERNER , Die Ableitung von Grenzwerten für die Wahl des Fassungsvermögens und der Geschwindigkeit von Personenaufzügen. In: Deutsche Hebe- und Fördertechnik, 14. Jg. 1968, S. 407-409.

VON NEUMANN, J., Distribution of the ratio of the mean square successive difference to the variance. In: The Annals of Mathematical Statistics, Volume 12 1941, S. 367-395.

VON NEUMANN, J., A further remark on the distribution of the ratio of mean square successive differences to the variance. In: The Annals of Mathematical Statistics, Volume 13 1942, S. 86-88.

PHILLIPS, R.S., Electric lifts. A manual on the current practice in the design, installation, working and maintenance of lifts. 5.th Edition, London 1966.

RITTER, CARL, Grundzüge neuer Steuerungsarten bei Aufzügen. In: Fördern und Heben, 3. Jg. 1953, S. 125-126.

SAATY, THOMAS L., Elements of queueing theory. New York, Toronto, London 1961.

SCHEUERMANN, ERNST-OTTO, Die Planung und Bemessung von Aufzügen. In: Deutsche Hebe- und Fördertechnik, 9. Jg. 1963, S. 404-408.

SCHRÖDER, JORIS, Personenaufzüge - Berechnung ihrer Förderleistung als Planungsgrundlage. In: Förden und Heben, 15. Jg. 1955, S. 44-50.

SCHRÖDER, JORIS, Personenaufzüge. Planung und Bemessung. In: VDI-Zeitschrift, 1957, S. 805-808

LEBENSLAUF

Ernst-Gunther Hansmann	4504 Georgsmarienhütte, Pappelgraben 8
Geboren am	21. 11. 1944 in Lage/Lippe
Staatsangehörigkeit	deutsch
Eltern	Ernst Hansmann, Kaufmann und Erika Dübgen, geb. Altehans, Lehrerin
Familienstand	verheiratet mit Aggie Wetzels, ein Kind
Schulen	April 1951 bis April 1955 Bürgerschule in Lage. 1955 bis 1956 Städt. Gymnasium in Bad Salzuflen. April 1956 bis Februar 1964 Hindenburgschule in Oldenburg/Oldb.
Reifeprüfung	14. 2. 1964
Studiengang	WS 1964/65 Studium der E-Technik an der TH Aachen. SS 1965 Studium der Betriebswirtschaftslehre in Aachen, vom WS 1965/66 bis einschließlich WS 1970/71 an der Universität Münster
Studienabschluß	Prüfung für Diplom-Kaufleute am 17. 10. 1969
Berufspraxis	1. 11. 1969 bis 30. 4. 1970 wissenschaftliche Hilfskraft, 1. 5. 1970 bis 31. 8. 1972 Verwalter einer wissenschaftlichen Assistentenstelle am Institut für Ökonometrie und Wirtschaftsstatistik an der Universität Münster. Seit dem 1. 9. 1972 Fach-

hochschullehrer an der Fachhochschule
Osnabrück, Fachbereich Wirtschaft,
für Mathematik, Statistik und Operations Research.